الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الميكانيك العام
هندسة ميكانيك الموائع

تحسين أداء دارات التبريد القاذفة للبخار من خلال التحكم بحقل الجريان في القاذف

أطروحة مقدمة لنيل درجة الدكتوراه في هندسة ميكانيك الموائع

إعداد

المهندس عامر المزعبر

إشراف

الدكتور عاصم قداح

أستاذ مساعد في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

2025

قرار لجنة الحكم

عُقِدتْ في تمام الساعة 12 من يوم الأربعاء 2025/4/30 لجنة الحكم على أطروحة الدكتوراه "**تحسين أداء دارات التبريد القاذفة للبخار من خلال التحكم بحقل الجريان في القاذف**" والمُشكّلة استناداً إلى قرار مجلس البحث العلمي والدراسات العليا في جامعة دمشق رقم /1957/م.ب.د المتخذ بالجلسة رقم /13/ تاريخ 2025/3/10 القاضي بتأليف لجنة الحكم على أطروحة الدكتوراه من السادة:

د. غسان زيدان جامعة دمشق	الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: آلات هيدروليكية	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية عضواً
د. حسين تينة جامعة دمشق	الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: ديناميك الغازات	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية عضواً
د. وجيه ناعمة جامعة دمشق	الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: هندسة تبريد	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية عضواً
د. علي خلوف جامعة دمشق	الأستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: ميكانيك السوائل والغازات والبلازما	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية عضواً
د. عاصم قداح جامعة دمشق	الأستاذ المساعد في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: ديناميك الغازات والسوائل	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية عضواً ومشرفاً

وقد أقرّت اللجنة ما يلي:

.....

.....

. .....

د. عاصم قداح د. علي خلوف د. وجيه ناعمة د. حسين تينة د. غسان زيدان

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرّح بعلمي الكامل وقبولي ما يلي:

1. أن كل ما ينتج عن البحث والاطروحة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني التزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الاطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دون نشر أو مكتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).
2. أنه لا يوجد أي جزء من هذه الاطروحة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل أو خارج الجمهورية العربية السورية.

م.عامر المزعبر

شكر وتقدير

مِن الكرمْ العَالي نقطِفُ الثمرْ

مِن النَبعْ الصَافي نشربُ... من نهرِ القمرْ

نُسابِقُ الليالِيَ في صفونا

نحو الطفولةِ ينحني النظرْ

أخبرتنا الغيومُ يوماً

أنّ هناك يوماً يُنتظرْ

مضت أيامٌ.. وهناك لا تزالُ أُخَرْ

يزول الكلُّ ...

ويبقى الأثرْ.

لقد كان إتمام مرحلة الدكتوراه رحلة حافلة بالتحديات والسعي الدائم نحو التعلّم العميق وما كان لها أن تتحقق لولا الدعم والتوجيه والتشجيع.

أولاً وقبل كل شيء أتقدم بأسمى آيات الامتنان لمشرفي الدكتور عاصم قدّاح الذي كان لتوجيهه وملاحظاته الثاقبة وصبره دورٌ أساسيٌّ في صياغة هذا البحث. لقد ألهمني تفانيه بعمله وإيمانه بعملي للسعي نحو البحث العلمي المتميز.

أتقدم بالشكر الجزيل إلى الدكتورة نادين بصمةجي على دعمها المعنوي واسهاماتها الكبيرة في انجاز هذا البحث. كانت بصماتها واضحة في جزء رئيسي من حياتي العملية والمهنية، وكان إيمانها بي مصدر من مصادر القوة لديّ.

إلى عائلتي، أتقدم بجزيل الشكر والامتنان. لقد ساعدني دعمكم وتفهمكم وتشجيعكم الدائم على تجاوز العقبات التي واجهتني خلال السنين السابقة.

كما إنّي ممتنٌّ لزملائي وأصدقائي في جامعة دمشق على تعاونهم وتقديمهم التسهيلات اللازمة التي ساعدت في انجاز هذه الاطروحة.

فهرس المحتويات

قرار لجنة الحكم 1
تصريح خطي 2
شكر وتقدير 3
فهرس المحتويات 4
فهرس الأشكال والرسوم البيانية..... 7
فهرس الجداول.....10
قائمة الاختصارات 11
قائمة المصطلحات 12
المستخلص 13
الإطار العام.....14
الفصل الأول الأسس الفيزيائية والرياضية لتحسين أداء القاذف البخاري 18
1-1 أداء القاذف البخاري 20
1-1-1 بارامترات الأداء..... 22
1-1-2 منحني أداء القاذف البخاري..... 23
1-2 المنطقة الفعّالة 24
1-3 موجات التمدد 25
1-4 التصميم الهندسي للقاذف بالاعتماد على التحليل الترموديناميكي 27
1-4-1 فوهة لافال 29
1-4-2 حجرة المزج..... 33
1-4-3 عنق الناشر 35
1-4-4 الجزء المتباعد من الناشر 36
الفصل الثاني الدراسات المرجعية.....39
الفصل الثالث ديناميك السوائل الحاسوبي لنمذجة وتحليل حقل الجريان في القاذف البخاري.....43
3-1 تحديد الشبك الأمثل.....44
3-2 اعداد برنامج *Fluent* 46

3-2-1 الشروط الحدية وخصائص سائل التشغيل 47
3-2-2 معايير تقارب الحل 49
3-3 مقارنة نموذج الغاز المثالي ونموذج الغاز الحقيقي 49
3-4 مطابقة نتائج النموذج الحاسوبي مع نتائج العلاقات الترموديناميكية النظرية 50
الفصل الرابع تأثير تغيّر البارامترات الهندسية التصميمية على أداء القاذف البخاري 58
4-1 تأثير مساحة مخرج الفوهة على أداء القاذف البخاري مع ثبات مساحة مدخل التيار الثانوي 59
4-1-1 تحليل حقل الجريان في القاذف *E12M3.7* 60
4-1-2 تحليل حقل الجريان في القاذف *E6.5M4.34* 62
4-1-3 تحليل حقل الجريان في القاذف *E3.4M5* 64
4-1-4 تحليل حقل الجريان في القاذف *E2.4M5.4* 66
4-1-5 تحليل حقل الجريان في القاذف *E1.9M5.6* 68
4-1-6 تحليل حقل الجريان في القاذف *E1.7M5.8* 70
4-1-7 تحليل حقل الجريان في القاذف *E1.4M6* 72
4-1-8 مقارنة أداء القواذف في الحالات المدروسة 74
4-2 تأثير مساحة مدخل التيار الثانوي على أداء القاذف البخاري 75
4-2-1 تحليل حقل الجريان في القاذف *E5M4.34* 75
4-2-2 تحليل حقل الجريان في القاذف *E5.6M4.34* 77
4-2-3 تحليل حقل الجريان في القاذف *E7.5M4.34* 78
4-2-4 تحليل حقل الجريان في القاذف *E10M4.34* 79
4-2-5 تحليل حقل الجريان في القاذف *E12M4.34* 81
4-2-6 تحليل حقل الجريان في القاذف *E13M4.34* 82
4-2-7 مقارنة أداء القواذف في الحالات المدروسة 83
4-3 تأثير مساحة مخرج الفوهة على أداء القاذف البخاري مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي 83
4-3-1 تحليل حقل الجريان في القاذف *E12.8M3.7* 84
4-3-2 تحليل حقل الجريان في القاذف *E11M3.84* 85

4-3-3 تحليل حقل الجريان في القاذف *E4.7M4.6* 87
4-3-4 تحليل حقل الجريان في القاذف *E2.9M5* 88
4-3-5 تحليل حقل الجريان في القاذف *E2.4M5.3* 90
4-3-6 مقارنة أداء القواذف في الحالات المدروسة 91
4-4 تأثير تغيّر المساحة النسبية لحجرة المزج على أداء القاذف البخاري.....92
الفصل الخامس التصميم الهندسي الجديد المقترح لحجرة المزج 94
5-1 مطابقة نتائج النموذج الحاسوبي مع النتائج التجريبية 96
5-2 المنحني المميز للقواذف المقترحة.....97
5-3 تقييم الأداء للتصاميم المقترحة 101
5-4 التفسير الفيزيائي لتحسين الأداء في التصاميم المقترحة من خلال تحليل حقل الجريان 104
5-4-1 تقييم الأداء في القاذف المقترح *Mix60-4*.....108
الفصل السادس الخاتمة.....115
6-1 خاتمة البحث 116
6-2 نتائج البحث.....116
6-3 التوصيات والمقترحات 119
قائمة المراجع.....120

فهرس الأشكال والرسوم البيانية

الصفحة

أشكال الفصل الأول

الشكل(1-1): تصنيف القاذف البخاري فوق الصوتي 20

الشكل(1-2): مخطط دارة تبريد قاذفة للبخار أحادية مرحلة الانضغاط 20

الشكل(1-3): الدورة الترموديناميكية لدارة التبريد القاذفة للبخار احادية المرحلة 21

الشكل(1-4): تغيرات الضغط وعدد ماخ لجريان وحيد البعد ايزوانتروبي على طول القاذف 21

الشكل(1-5): المنحني المميز للقاذف 23

الشكل(1-6): المنطقة الفعّالة 24

الشكل(1-7): علاقة نسبة السحب الكتلي بضغط المرجل 25

الشكل(1-8): مناطق اختناق التيار الثانوي 25

الشكل(1-9): تغير الضغط وعدد ماخ على طول فوهة لافال 26

الشكل(1-10): موجات االتمدد الشديد وموجات التمدد الضعيف 27

الشكل(1-11): الأبعاد التصميمية الرئيسية للقاذف 29

الشكل(1-12): الضغوط الأمامية والخلفية للفوهة 30

الشكل(1-13): التمدد الايزوانتروبي والتمدد الحقيقي في الفوهة 31

الشكل(1-14): علاقة المساحة النسبية للفوهة ونسبة تمدد الفوهة بعدد ماخ عند مخرجها 32

الشكل(1-15): أبعاد الفوهة 33

الشكل(1-16): موجة الصدمة العمودية للجريان الايزوانتروبي في عنق الناشر 35

الشكل(1-17): الانضغاط الايزوانتروبي والانضغاط الحقيقي في الجزء المتباعد من الناشر 37

الشكل(1-18): تغير خصائص الجريان وحيد البعد الايزوانتروبي على طول القاذف 38

أشكال الفصل الثالث

الشكل(3-1): الشبك 45

الشكل(3-2): علاقة نسبة السحب الكتلي مع عدد عناصر الشبك 45

الشكل(3-3): الشروط الحدية 48

الشكل(3-4): توزع الضغط الستاتيكي على جدار الناشر لنموذجي الغاز المثالي والحقيقي 50

الشكل(3-5): مجال صحّة استخدام العلاقات النظرية لحساب أقطار القاذف 51

الشكل(3-6): ترميز القاذف 55

الشكل(3-7): مقارنة النتائج الحاسوبية مع النتائج النظرية للتدفق الكتلي للتيار الأولي 57

أشكال الفصل الرابع

الشكل(4-1): أبعاد القاذف لدراسة تأثير البارامترات الهندسية التصميمية على الأداء 59

الشكل(4-2): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E12M3.7* 61

الشكل(4-3): تغيّر عدد ماخ قطرياً في القاذف *E12M3.7* 62

الشكل(4-4): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E6.5M4.34* 63
الشكل(4-5): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E6.5M4.34* 64
الشكل(4-6): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E3.4M5* 65
الشكل(4-7): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E3.4M5* 66
الشكل(4-8): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E2.4M5.4* 67
الشكل(4-9): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E2.4M5.4* 68
الشكل(4-10): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E1.9M5.6* 69
الشكل(4-11): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E1.9M5.6* 70
الشكل(4-12): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E1.7M5.8* 71
الشكل(4-13): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E1.7M5.8* 72
الشكل(4-14): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E1.4M6* 73
الشكل(4-15): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E1.4M6* 74
الشكل(4-16): نسبة السحب الكتلي للقواذف المدروسة لدراسة تأثير موجات التمدد 75
الشكل(4-17): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E5M4.34* 76
الشكل(4-18): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E5.6M4.34* 77
الشكل(4-19): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E7.5M4.34* 79
الشكل(4-20): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E10M4.34* 80
الشكل(4-21): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E12M4.34* 81
الشكل(4-22): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E13M4.34* 82
الشكل(4-23): نسبة السحب الكتلي للقواذف المدروسة لدراسة تأثير مساحة مدخل التيار الثانوي 83
الشكل(4-24): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E12.8M3.7* 85
الشكل(4-25): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E11M3.84* 86
الشكل(4-26): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E4.7M4.6* 88
الشكل(4-27): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E2.9M5* 89
الشكل(4-28): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E2.4M5.3* 91
الشكل(4-29): نسبة السحب الكتلي للقواذف لدراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي 92
الشكل(4-30): علاقة نسبة السحب الكتلي بالمساحة النسبية لحجرة المزج 93

أشكال الفصل الخامس

الشكل(5-1): حجرة المزج المنحنية 95
الشكل(5-2): أبعاد القاذف المدروس تجريبياً 96

الشكل(5-3): مقارنة النتائج الحاسوبية مع النتائج التجريبية 97
الشكل(5-4): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل ℃ 130 99
الشكل(5-5): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل ℃ 140 99
الشكل(5-6): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل ℃ 150 100
الشكل(5-7): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل ℃ 160 100
الشكل(5-8): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل ℃ 170 100
الشكل(5-9): علاقة نسبة السحب الكتلي للتصاميم المقترحة بدرجة حرارة المرجل 101
الشكل(5-10): علاقة الربح في نسبة السحب الكتلي بدرجة حرارة المرجل 102
الشكل(5-11): علاقة ضغط التكاثف الحرج بدرجة حرارة المرجل 103
الشكل(5-12): علاقة المردود للتصاميم المقترحة بدرجة حرارة المرجل 104
الشكل(5-13): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل ℃ 130 105
الشكل(5-14): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل ℃ 140 105
الشكل(5-15): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل ℃ 150 106
الشكل(5-16): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل ℃ 160 107
الشكل(5-17): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل ℃ 170 108
الشكل(5-18): توزع الضغط الستاتيكي في القاذف التقليدي والقاذف المقترح *Mix60-4* 109
الشكل(5-19): التدرّج اللوني لعدد ماخ للقاذف التقليدي والقاذف المقترح *Mix60-4* 110
الشكل(5-20): التوزّع القطري للضغط في مستوي المنطقة الفعّالة 111
الشكل(5-21): التوزّع القطري للسرعة في مستوي المنطقة الفعّالة 112
الشكل(5-22): التوزّع القطري للكثافة في مستوي المنطقة الفعّالة 112
الشكل(5-23): التدرّج اللوني لطاقة الاضطراب الحركية 113
الشكل(5-24): التوزّع القطري لطاقة الاضطراب الحركية في مستوي المنطقة الفعّالة 114

أشكال الفصل السادس

الشكل(6-1): المخطط المقترح لدارة التبريد القاذفة للبخار التجريبية 119

فهرس الجداول

الصفحة

جداول الفصل الثالث

الجدول(3–1): معايير جودة الشبك 46

الجدول(3–2): اعدادات برنامج *Fluent* المستخدمة في الدراسة 47

الجدول(3–3): خصائص سائل التشغيل 48

الجدول(3–4): ضغوط التشغيل ودرجات الحرارة الموافقة لها 48

الجدول(3–5): نتائج المحاكاة الحاسوبية لنموذج الغاز المثالي ونموذج الغاز الحقيقي 49

الجدول(3–6): شروط التشغيل المدروسة وخصائص بخار الماء المستخدم 51

الجدول(3–7): أقطار القاذف وفق العلاقات النظرية 55

الجدول(3–8): القيم النظرية ونتائج المحاكاة الحاسوبية للقواذف المصممة نظرياً 56

جداول الفصل الرابع

الجدول(4–1): أبعاد حجرة المزج في التصاميم المدروسة للقواذف لدراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات مساحة مدخل التيار الثانوي 60

الجدول(4–2): قيم البارامترات للقواذف المدروسة لدراسة تأثير موجات التمدد 74

الجدول(4–3): أبعاد حجرة المزج في التصاميم المدروسة للقواذف لدراسة تأثير مساحة مقطع دخول التيار الثانوي 75

الجدول(4–4): قيم البارامترات للقواذف المدروسة لدراسة تأثير مساحة مدخل التيار الثانوي 83

الجدول(4–5): أبعاد حجرة المزج في التصاميم المدروسة للقواذف لدراسة تأثير تغيير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل الناشر 84

الجدول(4–6): قيم البارامترات للقواذف المدروسة لدراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي 92

الجدول(4–7): معاملات التصحيح التصميمية 93

جداول الفصل الخامس

الجدول(5–1): ترميز حجرة المزج المنحنية 96

الجدول(5–2): نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج للقواذف المقترحة 97

الجدول(5–3): مجالات عمل القواذف المقترحة حسب شروط تشغيل المرجل 98

قائمة الاختصارات

دلالات الرموز *Nomenclatures*

A	مساحة مقطع الجريان	$[m^2]$	R_m	نسبة السحب الكتلي	-
AR_N	المساحة النسبية للفوهة	-	R_c	نسبة الانضغاط	-
AR_T	المساحة النسبية القاذف	-	s	الانتروبي	$\left[\frac{kJ}{kg.℃}\right]$
C_p	السعة الحرارية للغاز تحت ضغط ثابت	$\left[\frac{J}{kg.℃}\right]$	T, t	درجة الحرارة	℃
D	قطر	$[m]$	u	السرعة	$[m/s]$
h	الانتالبي	$[kJ/kg]$	v	الحجم النوعي	$[m^3/kg]$
k	معامل الأديابات	-	W	العمل	$[J]$
L	طول	$[m]$	W_p	الطاقة الميكانيكية لتشغيل المضخة	$[J]$
M	عدد ماخ	-	W_{fr}	عمل الاحتكاك	$[J]$
$\dot{m}$	التدفق الكتلي	$[kg/s]$	ρ	الكثافة	$[kg/m^3]$
P	الضغط	$[Pa], [kPa]$	η	المردود	-
Q	كمية الحرارة	$[J]$	$\eta_{ejector}$	مردود القاذف الاجمالي	-
$\dot{Q}_e$	الاستطاعة التبريدية للمبخر	$[W]$	θ	زاوية	°
$\dot{Q}_s$	استطاعة المرجل الحرارية	$[W]$			

دلالات الرموز السفلية *Subscripts*

e	البارامترات عند المبخر	N	بارامترات الفوهة
s	البارامترات عند المرجل	$2s$	شروط التيار الأولي عند مستوي مخرج الفوهة
c	البارامترات عند المكثف	$2v$	شروط التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة
cr	الشروط الحرجة عند عنق الفوهة	v	شروط الجريان في خط السحب
i	شروط الجريان عند الدخول لانبوبة تيار	1	شروط الجريان الداخل للفوهة
o	شروط الجريان عند الخروج من انبوبة تيار	2	شروط الجريان عند مستوي مخرج الفوهة
in	الشروط الداخلية لمجموعة ترموديناميكية	3	شروط الجريان عند بداية عنق القاذف
out	الشروط الخارجية لمجموعة ترموديناميكية	4	شروط الجريان عند نهاية عنق القاذف
D	بارامترات الجزء المتباعد من الناشر	5	شروط الجريان عند مخرج الناشر
C	بارامترات حجرة المزج	6	شروط الجريان عند خط السحب
T	بارامترات عنق القاذف		

قائمة المصطلحات

Contour	تدرّج اللون
Diffuser	ناشر
Efficiency	المردود
Nozzle efficiency	مردود الفوهة
Diffuser efficiency	مردود الناشر
Mixing efficiency	مردود المزج
Ejector	القاذف
Steam ejector	قاذف بخاري
Ejector throat	عنق القاذف
Flow	جريان
Reversed flow	جريان معكوس
Choked flow	جريان مخنوق
Unchoked flow	جريان غير مخنوق
Mass entrainment ratio	نسبة السحب الكتلي
Mixing chamber	حجرة المزج
Nozzle	فوهة
Nozzle exit	مخرج الفوهة
Nozzle throat	عنق الفوهة
Choked nozzle	فوهة مخنوقة
Pressure	ضغط
Evaporation pressure	ضغط التبخر
Condensation pressure	ضغط التكاثف
Boiler pressure	ضغط المرجل
Critical condensation pressure	ضغط التكاثف الحرج
Break-down Pressure	ضغط الانهيار
Stream	تيار
Secondary stream	التيار الثانوي
Primary stream	التيار الأولي

المستخلص

خلفية البحث

إنّ استخدام دارات التبريد القاذفة للبخار ظلَّ محدوداً بسبب انخفاض معامل أدائِها الذي يرتبط بشكل مباشر بأداء القاذف البخاري. كان تحسين أداء القواذف البخارية فوق الصوتية محطُّ اهتمام للعديد من الباحثين إذ أنّها يمكن أن تعمل على مصادر الحرارة البديلة منخفضة الطاقة. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير البارامترات التشغيلية والتصميمية على أداء القاذف البخاري فوق الصوتي واقتراح تصميم جديد بهدف تحسين الأداء باستخدام ديناميك السوائل الحاسوبي من خلال تحليل حقل الجريان في التصاميم المدروسة.

هدف البحث

يهدف البحث الى تحديد المجالات المثلى للبارامترات الهندسية والتشغيلية التي تضمن أفضل أداء للقاذف، ووضع العلاقات الرياضية الناظمة للتصميم الأمثل للقاذف ضمن شروط التشغيل المحددة.

المواد والطرائق

تم استخدام برنامج *ANSYS Fluent* لنمذجة ومحاكاة الجريان ضمن القاذف البخاري.

النتائج العملية

تم ايجاد أبعاد القاذف البخاري باستخدام العلاقات الترموديناميكية لحقل الجريان باعتباره ايزوانتروبياً وكانت نسبة الخطأ باستخدام هذه العلاقات مقبولة كما تم ايجاد مجال صحّة استخدامها. لوحِظ من الدراسة أن أداء القاذف البخاري المُصمم نظرياً ليس الأمثل، لذلك تم ايجاد معاملات تصحيح تصميمية لتعديل الأقطار للحصول على أفضل أداء من أجل شروط التشغيل المدروسة. تم اقتراح تصميم منحني جديد لحجرة المزج على شكل قوس. تم التحقق من أداء عشرة تصاميم مختلفة لحجرة المزج المنحنية ضمن مجال درجة حرارة المرجل 130 ℃~170 ℃ ودرجة حرارة المبخر 7.5 ℃. كانت زيادة نسبة السحب الكتلي كبيرة باستخدام التصميم الجديد والذي يترافق بانخفاض في ضغط التكاثف الحرج.

الاستنتاجات

إن مردود القاذف ذي حجرة المزج المنحنية أعلى من مثيله في التصميم التقليدي عند درجات حرارة مرجل أعلى من 140 ℃. الجدير بالذكر أنّ التصميم الذي يعطي مردوداً أعظمي يتغير بتغيّر درجة حرارة المرجل. تشير نتائج المحاكاة أيضاً إلى أن نسبة السحب الكتلي تنخفض مع ارتفاع درجة حرارة المرجل وهو سلوك مشابه للتصميم التقليدي. تم تفسير النتائج بناءً على تغيرات البارامترات في حقل الجريان وتوزّعها طولياً وعرضيّاً.

الكلمات المفتاحية

دارة التبريد القاذفة للبخار، القاذف البخاري فوق الصوتي، ديناميك السوائل الحاسوبي، نسبة السحب الكتلي، حجرة المزج المنحنية.

الإطار العام

مقدمة

تتفاقم الكوارث البيئية مؤخراً وتزداد نتائج الاحتباس الحراري ظهوراً حيث يُعتبر حرق الوقود الاحفوري أحد أهم مسبباتها كما يؤدي تسرّب وسائط التبريد والمركّبات التي تحتوي على ذرّات الكلور إلى نفاذ طبقة الاوزون. تستهلك أنظمة التبريد ولا سيما أنظمة تكييف الهواء جزءاً كبيراً من اجمالي الطاقة الكهربائية التي يتم توليدها بشكل رئيسي باستخدام الوقود لذلك يتم السعي إلى استخدام أجهزة تعمل بالاستفادة من الطاقات البديلة كالطاقة الشمسية ومصادر الطاقة المنخفضة كالحرارة الفائضة في المنشآت الصناعية. تُعتبر أنظمة التبريد القاذفة للبخار من الأنظمة الواعدة في هذا المجال حيث يُمكن تشغيلها باستخدام مصادر الطاقة المنخفضة كما يمكن استخدام الماء كسائل تشغيل والذي يُعتبر من أكثر وسائط التبريد صديقاً للبيئة وأقلها سميّةً. يبقى استخدام أنظمة التبريد القاذفة للبخار محدوداً ولم يلقَ انتشاراً واسعاً بسبب انخفاض معامل الأداء الذي يتراوح من 0.2 إلى 0.6 في أنظمة التكييف المركزي *(Little & Garimella, 2016)*. يرتبط أداء أنظمة التبريد القاذفة للبخار بأداء القاذف البخاري مباشرةً والذي يتحدد بكمية البخار التي يمكن أن تُستَجَر من المبخر. اهتمت الأبحاث العلمية في رفع أداء القاذف من خلال تحليل الجريان فيه وفهم تأثير البارامترات التشغيلية والهندسية عليه. حاولت الأبحاث تطوير أداء القاذف من خلال بعض النظريات التي كانت أولها نظرية *(Keenan & Neumann, 1942)* حيث اعتمد تحليلهما الرياضي على المعادلات الناظمة لديناميك الغازات كمعادلات انحفاظ الطاقة والكتلة وكمية الحركة، وتم استخدام هذه النظرية لاحقاً كأساس نظري في تصميم ودراسة القواذف الهوائية والبخارية مثل *(Porcar & Prenel, 1976)* و *(Fabri & Siestrunck, 1958)*. لم تفسّر نظرية *Keenan* ثبات أداء القاذف ضمن مجال ضغط تكاثف معين إلى أن تم توضيحها من قِبل *(Munday & Bagster, 1977)* من خلال مفهوم المنطقة الفعّالة وهي المنطقة التي يصل فيها تيار البخار القادم من المبخر إلى سرعة الصوت ويبلغ عندئذٍ التدفق الكتلي قيمة عظمى في شروط تشغيل محددة. تشكّل زيادة قيمة التدفق العظمى تحدياً حقيقياً للباحثين الذين لا يزالون يسعون إلى رفعها تارةً من خلال دراسة الشروط التشغيلية وتارةً أخرى من خلال تعديل الشكل الهندسي.

يقترح هذا البحث تصميماً جديداً للقاذف البخاري فوق الصوتي بهدف تحسين أدائه يعتمد على تغيير شكل بروفيل حجرة المزج وجعله منحني بدلاً من البروفيل المستقيم لحجرة المزج التقليدية، بالاضافة الى دراسة تأثير البارامترات الهندسية والتشغيلية التي لم تتطرق لها الدراسات السابقة.

الدراسات السابقة

يتم تصميم القاذف البخاري فوق الصوتي المستخدم في تطبيقات التبريد باستخدام العلاقات الترموديناميكية النظرية من أجل شروط تشغيل محددة. يُستخدم ديناميك السوائل الحاسوبي من أجل تحسين أداء القاذف الذي ينعكس على أداء دارة التبريد بشكل عام، حيث تعتبر وسيلة فعّالة في تصميم واختبار القاذف البخاري وتحليل حقل الجريان *(Ruangtrakoon & Aphornratana, 2019)*. درست الأبحاث السابقة تأثير كل من شروط التشغيل والتصميم الهندسي على أداء القاذف البخاري تجريبياً. تتضمن شروط التشغيل ضغوط الاشباع لكل من المرجل والمبخر والمكثّف. وضّحت هذه الدراسات أنّ زيادة ضغط المرجل يؤدي إلى انخفاض نسبة السحب الكتلي لكن تزداد قدرة القاذف على مقاومة ضغوط التكاثف المرتفعة أي يزداد ضغط التكاثف الحرج. يمكن التحكم بتدفق التيار الأولي باستخدام ابرة قابلة للضبط محورياً عند مدخل الفوهة عند شروط تشغيل محددة، تعطي هذه الطريقة نتائج أفضل بالمقارنة مع التحكم بالتدفق من خلال تغيير ضغط المرجل. تزداد نسبة السحب الكتلي مع ارتفاع درجة حرارة التبخر من أجل درجة حرارة تكاثف ومرجل ثابتين، أكّدت الأبحاث على أهمية الدقة في قياس ضغط التبخر لأن أي انحراف صغير في قياسه يؤدي إلى انحرافات ملحوظة في أداء القاذف. *(Ariafar et al., 2015; Dvorak & Safarik, 2005; Eames et al., 2007; Keenan et al., 1950; Kong et al., 2015; Lamberts, Chatelain, & Bartosiewicz, 2018; Y. Li & Yu, 2019; Lu et al., 2023; Rand et al., 2023; Ruangtrakoon & Aphornratana, 2014; Tang et al., 2019; Varga et al., 2011; R. L. Yadav & Patwardhan, 2008; Zhang et al., 2014; Zhu & Jiang, 2014)*. كما تزداد نسبة السحب الكتلي مع ازدياد كل من نسبة التمدد P_1^*/P_e^* ونسبة مساحة عنق الناشر إلى مساحة عنق الفوهة A_T/A_{cr} ومع انخفاض نسبة الانضغاط P_c^*/P_e^* حسب *(Sankarlal & Mani, 2007)*، لأن ازدياد نسبة التمدد يؤدي إلى ازدياد سرعة التيار الأولي الخارج من الفوهة مما يُسهم في زيادة نسبة السحب نتيجة انخفاض الضغط. وُجد أن نسبة المساحة الأمثل للقاذف تزداد خطياً مع ازدياد درجة حرارة المرجل ضمن شروط التشغيل المدروسة (Yapici et al., 2008).

مشكلة البحث

ترتبط المشكلة التي يعالجها البحث بانخفاض معامل أداء دارات التبريد القاذفة للبخار والتي تتعلق مباشرةً بالتدفق الكتلي الأعظمي لتيار البخار القادم من المبخر، إن محدودية التدفق الكتلي لهذا التيار ناتجة عن الشكل الهندسي لحجرة المزج في القاذف بالإضافة إلى طبيعة الجريان المعقدة ضمنه. يتطلب ذلك معرفة معمقة لحقل الجريان حيث تحتاج دراسته لأبحاث إضافية.

هدف البحث

يهدف البحث الى تحسين أداء القاذف البخاري من خلال تحديد المجالات المثلى للبارامترات الهندسية والتشغيلية التي تضمن أفضل أداء للقاذف، ووضع العلاقات الرياضية الناظمة للتصميم الأمثل للقاذف ضمن شروط التشغيل المحددة.

أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في رفع معامل أداء لدارات التبريد القاذفة للبخار والذي يؤدي الى تخفيض معدل استهلاك الطاقة لتشغيل هذه الدارات، وهو موضوع مهم وقيد الدراسة في الدول المتقدمة حيث يتم السعي لإيجاد حلول لرفع قيمة هذا المعامل حتى يومنا هذا وهو ما تؤكده الدراسات المرجعية الحديثة.

مسوغات البحث

تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية قدر الامكان في تشغيل دارات التبريد وبالتالي تحقيق الوفر الاقتصادي.

محددات البحث

- سائل التشغيل المدروس هو بخار الماء والبخار مشبع.
- الجريان ايزوانتروبي.
- فوهة مخنوقة.
- ضغط التكاثف أقل من ضغط التكاثف الحرج.
- لا يوجد تبادل حراري بين جسم القاذف والوسط المحيط.
- معامل الأداء لدارة التبريد القاذفة للبخار أقل من الواحد.
- جميع العمليات الترموديناميكية التي تحدث في القاذف تحصل عند ضغوط مطلقة منخفضة جداً
- يتم الجريان في القاذف ضمن شروط الجريان المخنوق من المبخر إلى المكثف وعبر فوهة لافال.

حدود البحث

تنحصر هذه الدراسة ضمن الحدود التالية:

- القاذف بخاري فوق صوتي.
- مجال تطبيقات تكييف الهواء أي درجات حرارة تبخر أكبر من 0 ℃.
- استطاعات صغيرة بحدود $[W]$ 1000~3500 وبأبعاد صغيرة.
- تتم الدراسة على بخار الماء كسائل تشغيل.
- مجال درجات حرارة المرجل المدروسة 130℃~170℃ ودرجة حرارة التبخر 7.5 ℃.

منهج البحث وأدواته

ستتم الدراسة في هذا البحث وفق منهج يعتمد على أساس نظري ودراسة حاسوبية وفق ما يلي:

المحور الأول: الدراسة النظرية والمرجعية

1. وضع الأساس النظري للدراسة ووضع الحل الرياضي للمسألة المدروسة
2. التوسع في البحث عن أبحاث علمية في الموضوع ذاته

المحور الثاني: تنفيذ محاكاة حاسوبية

1. اختبار القاذف البخاري المصمم بالاعتماد على العلاقات النظرية.
2. دراسة تأثير موجات التمدد ومساحة مدخل التيار الثانوي على الأداء.
3. اقتراح واختبار تصميم هندسي جديد لحجرة المزج بهدف رفع الأداء.

الفصل الأول

الأسس الفيزيائية والرياضية لتحسين أداء القاذف البخاري

Performance Optimization of Steam Ejectors: Physical Principles and Mathematical Models

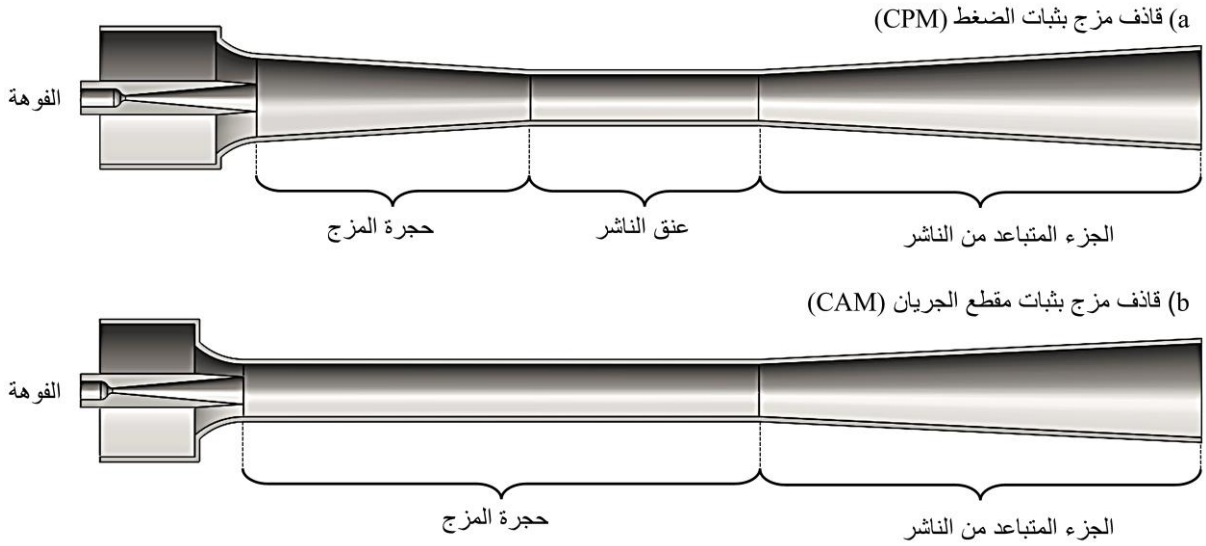
يَعتمد عمل القاذف البخاري على نقلِ جزءٍ من كميةِ الحركة من سائلٍ يتدفقُ بسرعة كبيرة إلى سائل آخر بهدفِ ضخّه من خلال رفع طاقته الحركية. يبين الشكل(1−1) أجزاء القاذف وهما بشكل رئيسي فوهة لافال والناشر. يتألّف الناشر من حجرة المزج، وعنق الناشر والمقطع المتباعد من الناشر. يُستخدم القاذف البخاري في تطبيقات هندسية عديدة مثل منشآت المعالجة الكيميائية ودارات التكييف المركزي (Besagni et al., 2016). يعملُ القاذف البخاري في دارات التبريد القاذفة للبخار عملَ الضاغط الميكانيكي في دارات التبريد الانضغاطية البخارية ويمكن تصنيفه من حيث آلية المزج إلى:

- مزج بثبات الضغط *Constant-Pressure Mixing Ejector (CPM)*.
- مزج بثبات مقطع الجريان *Constant-Area Mixing Ejector (CAM)*.

تَكون حجرة المزج ذات مقطع متقارب في النوع الأول كما هو موضّح في الشكل(1−1−*a*) حيث يُفترض أن يبقى الضغط الستاتيكي ثابتاً في حجرة المزج حسب *(Keenan & Neumann, 1942)*، أظهرت النتائج التجريبية حسب *(Eames et al., 1999)* أن الضغط الستاتيكي المُقاس على طول حجرة المزج ثابت. أما في النوع الثاني فإن مخرج الفوهة يتوضع ضمن حجرة المزج ذات المقطع الثابت كما هو مبين في الشكل(1−1−*b*). تم اختبار ودراسة كلا النوعين تجريبياً بشكل موسع ووُجد أن أداء القاذف ذو الضغط الثابت أفضل نظراً لقدرته على العمل عند ضغوط تكاثف أكبر على الرغم من أنه يمكن الحصول على نسب سحب كتلي أكبر في القاذف ذو المقطع الثابت ضمن شروط معينة حسب *(Pianthong et al., 2007)*. اهتمت معظم الأبحاث بدراسة القاذف ذو الضغط الثابت. *(Besagni et al., 2016; Chunnanond & Aphornratana, 2004b)*

تم اقتراح طريقة تحليلية لتصميم القاذف البخاري من قِبل *Eames (2002)* اعتمدت على مبدأ ثبات معدل تغير كمية الحركة على طول القاذف *Constant Rate of Momentum-Change ejector (CRMC)* والذي يؤدي إلى تصميم بروفايل جديد لجدار الجزء المتباعد من الناشر. يلغي هذا التصميم تأثير موجات الصدمة في الناشر عند شروط التشغيل التصميمية حيث يكون تغيّر الضغط الستاتيكي تدريجي. وُجِدَ أن نسبة السحب الكتلي للقواذف ذات معدل تغير كمية الحركة الثابت *CRMC* أكبر منها في القواذف ذات المزج تحت ضغط ثابت *CPM* بقليل، أما ضغط التكاثف الحرج فكان أكبر بشكل ملحوظ. (Eames, 2002; V. Kumar et al., 2013; S. K. Yadav et al., 2020).

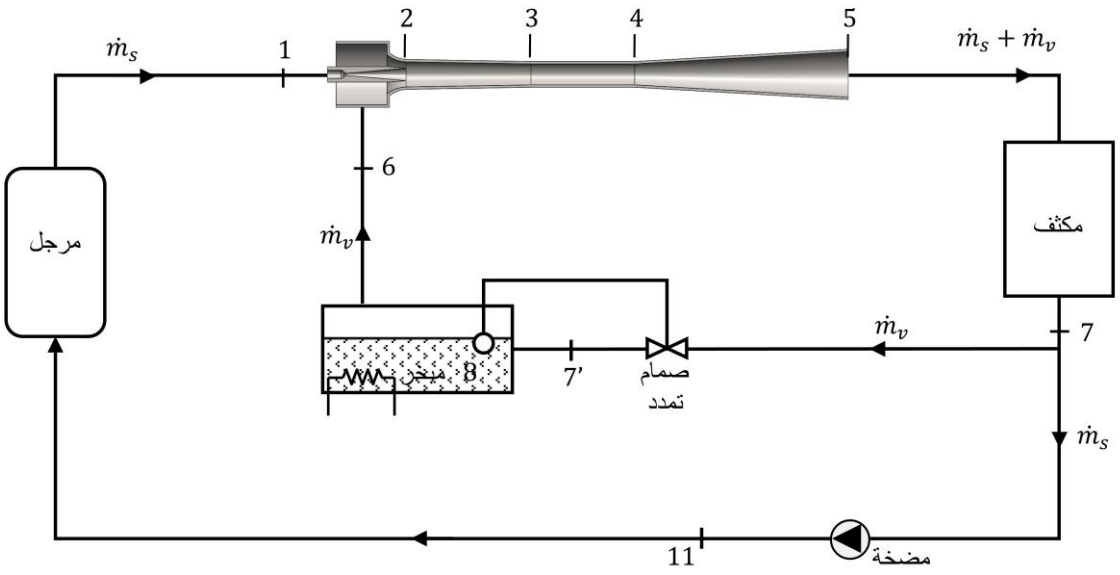
يهتم هذا البحث بدراسة القاذف البخاري فوق الصوتي ذو الضغط الثابت المستخدم في دارات التبريد القاذفة للبخار حيث تكون حجرة المزج ذات مقطع متقارب وهي الأكثر استخداماً.



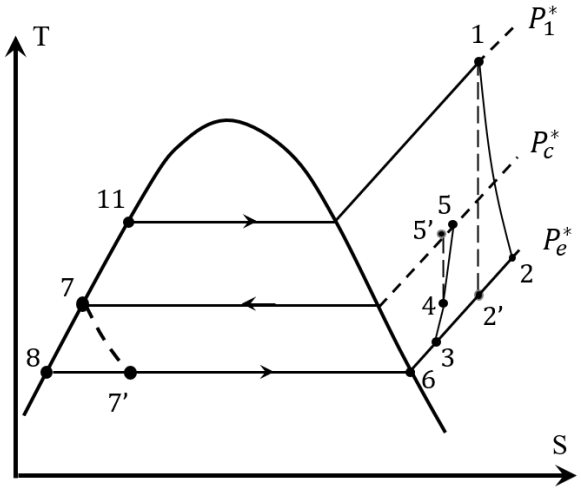
الشكل(1−1): تصنيف القاذف البخاري فوق الصوتي

1−1 أداء القاذف البخاري *Performance of steam ejector*

يتم سحب البخار من المبخر ورفع ضغطه إلى ضغط التكاثف بالاستفادة من الطاقة الحركية للتيار الأولي القادم من المرجل ليمتزج التياران داخل القاذف ويتجه المزيج نحو المكثف بعد رفع ضغطه ضمن الناشر. يتم ضخ السائل المتكاثف من المكثف إلى المرجل باستخدام مضخة ذات ازاحة موجبة، ويُخنق السائل المتوجه إلى المبخر عبر صمام التمدد كما يبين الشكل(1−2) وفق العملية $7' \rightarrow 7$ من ضغط التكاثف إلى ضغط التبخر بثبات الانتالبي $(h_7 = h_{7'})$. يتبخر جزء من السائل في المبخر نتيجة انتزاع كمية من الحرارة الكامنة منه لتنخفض درجة حرارته إلى درجة حرارة الاشباع T_e^* الموافقة لضغط الاشباع P_e^* ويتمثّل التبخير في المبخر بالعملية الترموديناميكية $6 \rightarrow 8$ على مخطط $T\text{-}s$ بثبات الضغط، كما يبين الشكل(1−3). *(Ruangtrakoon & Aphornratana, 2019)*

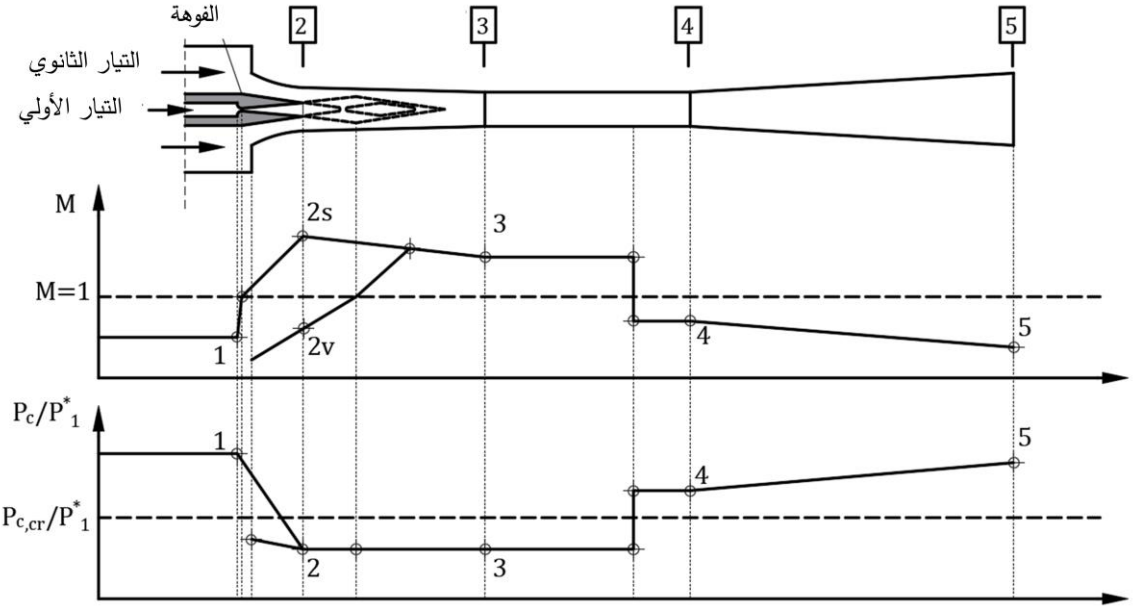


الشكل(1−2): مخطط دارة تبريد قاذفة للبخار أحادية مرحلة الانضغاط



الشكل(1−3): الدورة الترموديناميكية لدارة التبريد القاذفة للبخار احادية المرحلة

يبين الشكل(1−4) تغيرات الضغط الستاتيكي وعدد ماخ لكل من التيارين الأولي والثانوي على طول القاذف. يتمدد التيار الأولي القادم من المرجل بضغط مرتفع P_1^* عبر فوهة لافال حيث يخرج منها بسرعة فوق صوتية عند مستوي مخرج الفوهة والمتمثل بالحالة *2s*، ويُشكّل موجات تمدد ضمن حجرة المزج أو ما يُعرف بنواة التيار الأولي *primary jet core*. ينتج عن هذا التمدد ضغطاً منخفضاً P_2 في حجرة المزج ويسحب البخار من المبخر المتمثل بالحالة *2v*، تدعى هذه العملية بالسحب *entrainment*. تنتقل كمية الحركة من التيار الأولي إلى التيار الثانوي تدريجياً حتى يمتزج التياران بشكل كامل في نهاية حجرة المزج (3). ثم ينضغط المزيج بتأثير موجة الصدمة العمودية حسب نظرية *Kennan* والتي تحدث في عنق الناشر التي تنقل الجريان من فوق صوتي إلى تحت صوتي فجأةً (4). يزداد الضغط مع تزايد مساحة المقطع المتوسّع من الناشر وتتناقص سرعة الجريان حتى يصل الجريان إلى حالة الاشباع الموافق لضغط التكاثف (5). (Eames et al., 1995)



الشكل(1−4): تغيرات الضغط وعدد ماخ لجريان احادي البعد ايزوانتروبي على طول القاذف

1-1-1 بارامترات الأداء *Parameters of performance*

تحدد كمية البخار المسحوب من المبخر الاستطاعة التبريدية للدارة أي كلما زاد معدل تدفق التيار الثانوي ازداد أداء الدارة وبالتالي توفير الطاقة. بالتالي فإن أداء دارة التبريد القاذفة للبخار يرتبط ارتباطاً مباشراً بأداء القاذف. تُستخدم عدة بارامترات لتحديد أداء القاذف البخاري في دارات التبريد القاذفة للبخار وهي مايلي: (Besagni et al., 2016; Tashtoush et al., 2019)

- نسبة السحب الكتلي *Entrainment Ratio*: تعرّف نسبة السحب الكتلي أنها نسبة التدفق الكتلي للتيار الثانوي القادم من المبخر $\dot{m}_v$ إلى التدفق الكتلي للتيار الأولي $\dot{m}_s$.

$$R_m = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_s} \tag{1.1}$$

- نسبة الانضغاط *Compression Ratio*: تعرّف نسبة الانضغاط أنها نسبة الضغط الستاتيكي لمخرج الناشر P_c^* إلى الضغط الستاتيكي لمدخل التيار الثانوي P_e^*.

$$R_c = \frac{P_c^*}{P_e^*} \tag{1.2}$$

- معامل الأداء *Coefficient of Performance*: يُعرّف معامل الأداء لدارة التبريد القاذفة للبخار بأنه نسبة معدل الطاقة الحرارية المتبادلة في المبخر $\dot{Q}_e$ إلى معدل الطاقة المستهلكة لتشغيل الدارة

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_s + W_p} \tag{1.3}$$

حيث $\dot{Q}_s$ الاستطاعة الحرارية المطلوبة لعمل المرجل و W_p الطاقة الميكانيكية اللازمة لتشغيل المضخة، يمكن اهمال الاستطاعة المطلوبة لتشغيل المضخة بالمقارنة مع الاستطاعة الحرارية المطلوبة في المرجل $\dot{Q}_s \gg W_p$ بالتالي يمكن كتابة علاقة معامل الأداء كالتالي:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_s} = \frac{\dot{m}_v(h_6 - h_8)}{\dot{m}_s(h_1 - h_{11})} = R_m \frac{(h_6 - h_8)}{(h_1 - h_{11})} \tag{1.4}$$

h_1, h_6, h_8, h_{11} : انتالبي النقاط المبينة على مخطط T-s في الشكل(1-3)

لذلك تُعتبر نسبة السحب الكتلي مؤشر مباشر لأداء دارة التبريد القاذفة للبخار.

- مردود القاذف *Ejector Efficiency*: يُعرّف بأنه نسبة الطاقة اللازمة للانضغاط إلى معدل الطاقة النظرية المتوفرة للتيار الأولي و يمكن أن يُعطى بعدة علاقات. عادةً ما يرافق الزيادة في نسبة السحب الكتلي انخفاضاً في قدرة القاذف على تحمل ضغوط التكاثف المرتفعة. يأخذ المردود الكلي للقاذف حسب تعريف *(Dvorak & Vit, 2005)* في الاعتبار تأثير ضغط التكاثف، مما يضمن استخدام الطاقة بشكل فعال حسب العلاقة التالية:

$$\eta_{ejector} = R_m \frac{1 - \left(\frac{P_e^*}{P_c^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{\left(\frac{P_1^*}{P_c^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \qquad (1.5)$$

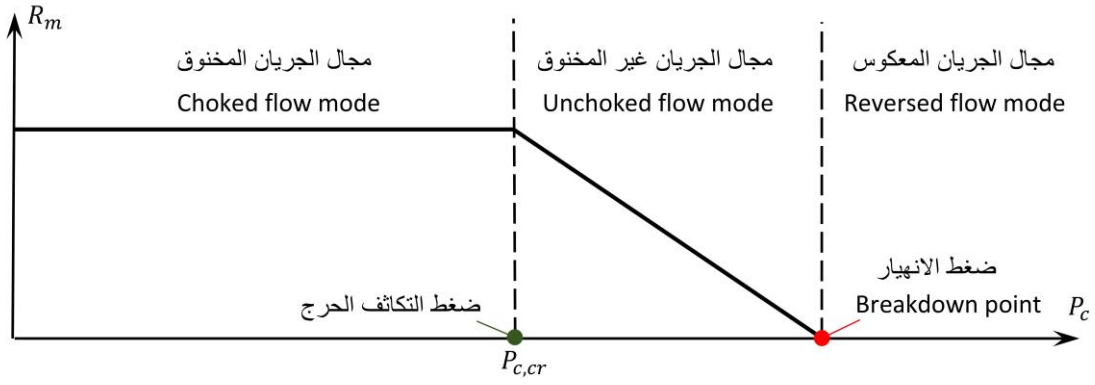
1-1-2 منحني أداء القاذف البخاري *Performance curve of steam ejector*

يصف منحني الأداء العلاقة بين نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج كما يبين الشكل(1-5). ينقسم عمل القاذف البخاري إلى ثلاثة مجالات مع ثبات ضغط المرجل وهي:

1- جريان مخنوق *Choked flow*: يُقصد به اختناق التيار الثانوي أي وصول سرعته الى سرعة الصوت، يعمل القاذف في هذا المجال عندما يكون ضغط التكاثف أقل من قيمة حرجة $P_c < P_{c_{cr}}$، وتكون نسبة السحب الكتلي ثابتة $R_m = const.$ من أجل شروط تشغيل معينة. تحدث موجة الصدمة في هذه الحالة في عنق القاذف ويعتمد مكان حدوثها على ضغط التكاثف من دون أن تؤثر على عملية المزج. تم تفسير ثبات نسبة السحب الكتلي في مجال الجريان المخنوق من قِبل *(Munday & Bagster, 1977)* بسبب اختناق التيار الثانوي وبلوغ التدفق الكتلي له قيمة عظمى عند شروط التشغيل المدروسة.

2- جريان غير مخنوق *Unchoked flow*: أي أن التيار الثانوي لا يبلغ سرعة صوتية في حجرة المزج، يعمل القاذف بضغط تكاثف أكبر من قيمة حرجة $P_c > P_{c_{cr}}$، تنخفض عندئذ نسبة السحب الكتلي بشكل كبير مع ازدياد ضغط التكاثف. يمكن أن يسبب انخفاض ضغط المرجل أو انخفاض كمية البخار في المبخر عدم اختناق التيار الثانوي في حجرة المزج أيضاً.

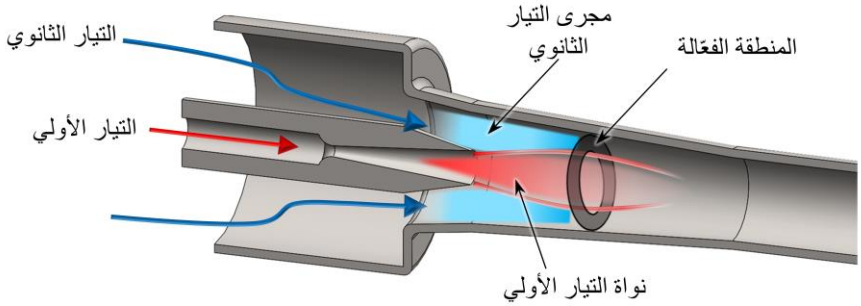
3- مجال التدفق المعكوس *Reversed flow*: عندما يكون ضغط التكاثف أعلى من قيمة معينة تدعى ضغط الانهيار عندئذ يتدفق الجريان بشكل عكسي من المكثف نحو المبخر، يزداد ضغط المبخر حتى يصبح كافٍ لاستئناف الجريان الطبيعي، إذا بقي الحمل التبريدي في المبخر منخفضاً يستمر الجريان في القاذف بالتقلب بين شروط الجريان الطبيعي والمعكوس. يعتمد ذلك على أبعاد وحجم وتصميم انبوب السحب وعلى كمية البخار في المبخر. *(Little & Garimella, 2016; Sriveerakul et al., 2007b)*.



الشكل(1-5): المنحني المميز للقاذف

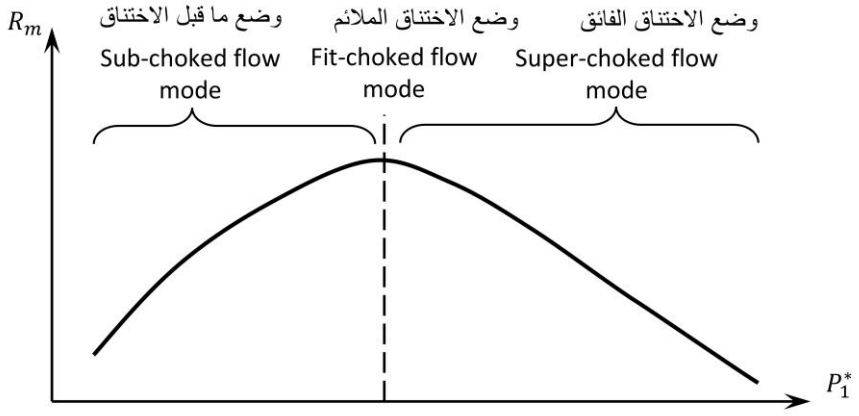
2-1 المنطقة الفعّالة *Effective area*

تم اقتراح فرضية المنطقة الفعالة من قِبل *(Munday & Bagster, 1977)* وهي المستوي الذي تصبح فيه سرعة التيار الثانوي صوتية في حجرة المزج، كان يُعتقد أن المنطقة الفعالة ثابتة مع تغير شروط التشغيل إلى أن أثبتت النتائج التجريبية حسب (Huang et al., 1985) أنّ موضع المنطقة الفعالة متغير مع تغير شروط التشغيل. يفرِض مجرى السحب المبين في الشكل(1-6) المحصور بين جسم القاذف ونواة التيار الأولي حدوداً عظمى لنسبة السحب الكتلي. يمكن زيادة كمية البخار المسحوب من المبخر من خلال تكبير مجرى السحب، يمكن الحصول على ذلك من خلال انزياح المنطقة الفعالة نحو المصب بعيداً عن مخرج الفوهة أو من خلال استخدام فوهة بقطر عنق أصغر أو انزياح الفوهة نحو خارج حجرة المزج لكن يعمل القاذف عندئذ بضغط تكاثف حرج أقل *(Chunnanond & Aphornratana, 2004a; Lamberts, Chatelain, Bourgeois, et al., 2018)*. يتم تحديد المنطقة الفعّالة عندما يكون الضغط الستاتيكي عند الجدار أصغري *(Chunnanond & Aphornratana, 2004a; Han et al., 2020)*.



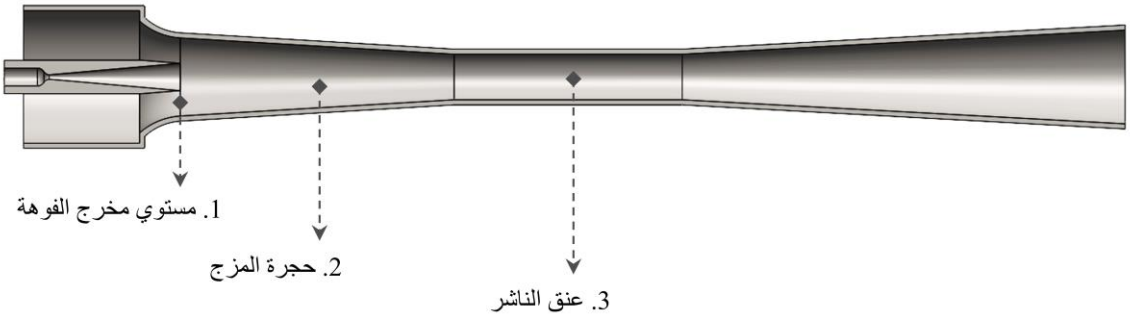
الشكل(1-6): المنطقة الفعّالة

يبين الشكل(1-7) حالة اختناق التيار الثانوي تبعاً لضغط المرجل: يعمل القاذف دون أن يصل التيار الثانوي إلى سرعة الصوت عندما يكون ضغط المرجل منخفضاً ويدعى مجال العمل هذا بوضع ما قبل الاختناق *sub-choked flow mode*. مع ارتفاع ضغط المرجل تزداد سرعة التيار الأولي وتزداد كمية الحركة المنتقلة الى التيار الثانوي إلى أن يصل إلى قيمة يختنق فيها التيار الثانوي ويكون التدفق الكتلي للتيار الثانوي أعظمياً ويدعى بوضع الاختناق الملائم *fit-choked flow mode* ، مع ارتفاع ضغط المرجل يبدأ تدفق التيار الثانوي بالانخفاض وبالتالي نسبة السحب الكتلي ويدعى هذا المجال بوضع الاختناق الفائق *super-choked flow mode*. تنزاح المنطقة الفعالة في هذه الحالة نحو نهاية حجرة المزج وبالتالي تصغر المنطقة الفعالة ومجرى السحب يصبح أضيق مسبباً انخفاضاً في نسبة السحب الكتلي. يوضّح هذا التحليل أهمية دور المنطقة الفعالة ومكان حدوثها في تحديد أداء القاذف *(Han et al., 2020)*.



الشكل(1−7): علاقة نسبة السحب الكتلي بضغط المرجل

يمكن أن يختنق التيار الثانوي ضمن القاذف البخاري إما عند مستوي مخرج الفوهة أو في حجرة المزج أو في عنق الناشر كما يبين الشكل(1−8). اقترح *Munday* (1977) بأن عملية المزج تبدأ بعد أن يصبح الجريان الثانوي صوتياً، في حين اعتبر (Chou et al., 2001) اختناق المزيج وليس اختناق التيار الثانوي.



الشكل(1−8): مناطق اختناق التيار الثانوي

1−3 موجات التمدد *Expansion waves*

تتغير بارامترات الجريان على طول الفوهة بسبب تغير المقطع. يجب تحقق الشرطين التاليين من أجل الحصول على سرعة فوق صوتية لجريان التيار الأولي عند مخرج الفوهة $(2s)$:

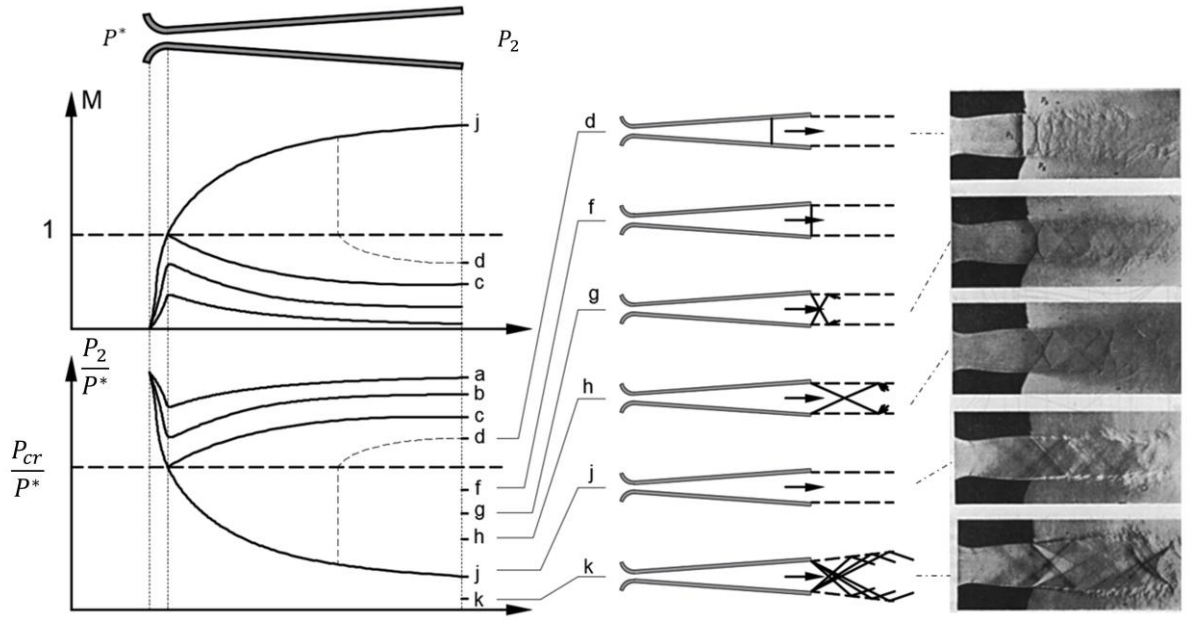
1. أن تكون مساحة مخرج الفوهة أكبر من مساحة مقطع عنق الفوهة.
2. أن تتحقق العلاقة $P_{cr}/P_1^* \leq (2/k+1)^{k/k-1}$

يبين الشكل(1−9) تغيرات كل من الضغط الستاتيكي وعدد ماخ على طول الفوهة مع تغير الضغط الخلفي P_2 الذي يمثل ضغط حجرة المزج باعتباره متساوياً قطرياً. بفرض أن المرجل خزان كبير ضغطه ثابت P_1^* ودرجة حرارته T_1^* ويصب الجريان في الطرف الآخر في وسط لامتناه في الاتساع:

يمثل المنحنيين a,b تغيرات الضغط وعدد ماخ عندما يكون الضغط الخلفي P_2 أقل من ضغط المرجل ويكون الجريان تحت صوتي على كامل الفوهة، إن استمرار تخفيض الضغط الخلفي سيزيد من التدفق والسرعة

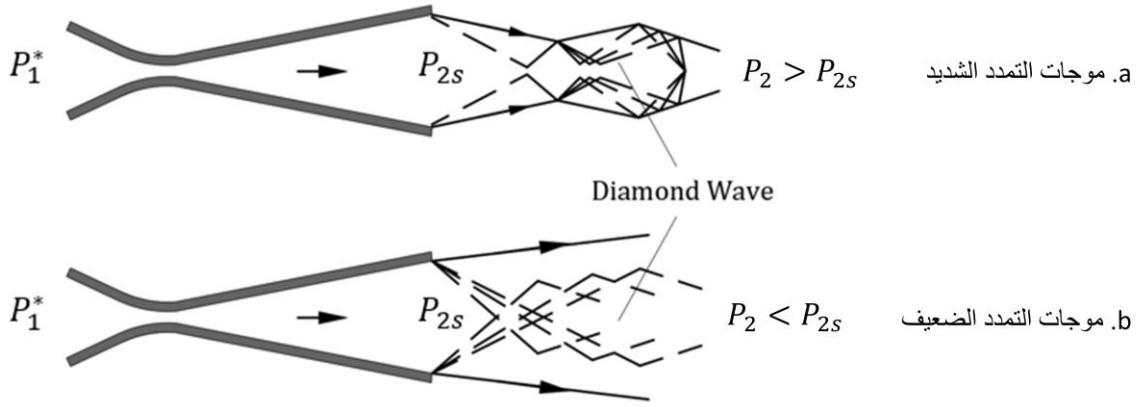
عند المقطع الأصغري للفوهة حتى تبلغ السرعة عند العنق قيمة عظمى يكون عندها $M = 1$ لكن يعود عدد ماخ بعد العنق للتناقص والضغط للازدياد وهذا ما يمثله المنحني c . مع تخفيض الضغط الخلفي إلى أقل من قيمة P_c ينقلب الجريان الى فوق صوتي بتشكّل موجة صدمة في عنق الفوهة لكن تتشكل موجة صدمة ثانية في الجزء المتباعد لتنقل الجريان من فوق صوتي إلى تحت صوتي ويعتمد موقع حدوثها على قيمة الضغط الخلفي وهذا ما يمثله المنحني d. تنزاح موجة الصدمة مع تخفيض الضغط الخلفي نحو مخرج الفوهة حتى تصل إلى مستوي مخرج الفوهة عندما يصبح مساوياً قيمة P_f ويصبح الجريان فوق صوتي على كامل الجزء المتباعد للفوهة.

تتشكل موجات تمدد خلف مخرج الفوهة تدعى موجات التمدد شديد *over-expanded waves* إذا انخفض الضغط الخلفي إلى قيمة أقل P_f $(P_j < P_2 < P_f)$ حيث تحصل زيادة في الضغط الخلفي أكبر من الضغط عند مستوي مخرج الفوهة عبر موجة صدمة مائلة متصلة بمخرج الفوهة. وتتشكل موجات التمدد الضعيف خلف مخرج الفوهة *under- expanded waves* عندما ينخفض الضغط الخلفي عن قيمة معينة $P_2 < P_j$.
(H. W. Liepmann & A. Roshko, 2001; J. Anderson, 2021)



الشكل(1−9): تغير الضغط وعدد ماخ على طول فوهة لافال *(Liepmann. 1957)*

يتجه الجريان في حالة موجات التمدد الشـــديد نحو المحور كما يبين الشـــكل$(1-10-a)$، حيث يكون الضـغط الخلفي أكبر من الضـغط عند مسـتوي مخرج الفوهة $P_2 > P_{2s}$. أما في حالة موجات التمدد الضـعيف فإن الجريـان يتجـه مبتعداً عن المحور حيث $P_2 < P_{2s}$ ويكون الجريـان قـابـل للتمـدد بعـد الفوهـة كمـا يبين الشـــكل$(1-10-b)$. تولّد موجات التمدد المتداخلة نواة جريان تأخذ شـــكل الجوهرة وتدعى *diamond wave* *.(Cengel & Boles, 2015; J. Anderson, 2021)*



الشكل(1−10): موجات التمدد الشديد وموجات التمدد الضعيف *(J. Anderson, 2003)*

1−4 التصميم الهندسي للقاذف بالاعتماد على التحليل الترموديناميكي

Ejector geometry design based on thermodynamic analysis

يعتمد التحليل النظري في هذه الدراسة على نظرية الجريان احادي البعد لغاز مثالي. عند استخدام بخار الماء كسائل تشغيل فإن فرضية الغاز المثالي تبقى قائمة لأن جميع العمليات الترموديناميكية التي تحدث في القاذف تحصل عند ضغوط منخفضة جداً. تعتبر معادلات الجريان الناظمة لعمل القاذف معقدة لذلك تُستخدم فرضيات تبسيط تؤدي إلى معادلات تصف علاقات الأداء. إن دراسة الجريان في القاذف على أنه قابل للانضغاط يستدعي دراسة ترموديناميكية للجريان *(Power, 2021; Ruangtrakoon & Aphornratana, 2019)*

يخضع الجريان في القاذف البخاري للعلاقات الأساسية التالية:

(Cengel & Boles, 2015; H. W. Liepmann & A. Roshko, 2001)

1− معادلة الحالة: تصف علاقة الضغط المطلق والحجم النوعي ودرجة الحرارة المطلقة للغاز الكامل:

$$P = \rho RT = \frac{RT}{v} \tag{1.6}$$

2− معادلة الاستمرار: بفرض وجود جريان مستقر لسائل قابل للانضغاط بين مقطعين *(i)* و *(o)* من جريان مستقر، تكتب معادلة الاستمرار كما يلي:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0 \tag{1.7}$$

3− معادلة الحركة: تأخذ معادلة الحركة في حالة الإجراء الايزوانتروبي بإهمال قوى الثقالة والفواقد (سائل مثالي) بين مقطعين *(i)* و *(o)* من جريان مستقر الشكل التالي:

$$u_o^2 = u_i^2 + \frac{2k}{k-1}\frac{P_i}{\rho_i}\left[1 - (P_o/P_i)^{\frac{k-1}{k}}\right] \tag{1.8}$$

4− معادلة كمية الحركة: تكتب معادلة كمية الحركة بين مقطعين *(i)* و *(o)* من جريان مستقر بالشكل التالي:

$$\rho_o A_o u_o^2 - \rho_i A_i u_i^2 + P_o A_o - P_i A_i - P_m(A_o - A_i) = 0 \tag{1.9}$$

حيث P_m الضغط الوسطي بين المقطعين المدروسين، وهي معادلة كمية الحركة لجريان مستقر وحيد البعد ثابت المقطع لسائل قابل للإنضغاط وغير لزج.

5- القانون الأول في الترموديناميك: وفقاً لهذا القانون عندما تخضع المجموعة لتغير في الحالة أو إلى عملية ترموديناميكية يحدث تبادل حراري وانتقال للعمل ويكتب بالشكل العام بين مقطعين *(i)* و *(o)* كالتالي:

$$Q_{out} + Q_{in} = W_M + W_{fr} + (h_o - h_i) + g(z_o - z_i) + \left(\frac{u_o^2 - u_i^2}{2}\right) \qquad (1.10)$$

حيث:

Q_{in}: الطاقة الحرارية الداخلية W_M: العمل الميكانيكي المنجز لـ $1\ kg$ من الغاز

Q_{out}: الطاقة الحرارية المتبادلة مع الوسط المحيط. W_{fr}: عمل الاحتكاك الناتج عن $1\ kg$ من الغاز

يعمل القاذف الذي يستخدم في دارات التبريد تحت شروط العمل المستقر وبفرض أن الطاقة الحرارية الداخلية مساوية لعمل الاحتكاك $Q_{in} = W_{fr}$ وبفرض أنه معزول $Q_{out} = 0$ والعمل الميكانيكي معدوم $W_M = 0$ والقاذف أفقي $z_o = z_i$ يُكتب القانون الأول في الترموديناميك بالعلاقة التالية:

$$h_i + \frac{u_i^2}{2} = h_o + \frac{u_o^2}{2} \qquad (1.11)$$

6- القانون الثاني في الترموديناميك: ينص حسب صيغة كلاوزيوس بما يلي: من غير الممكن بناء آلة تعمل بدورة ترموديناميكية مغلقة تقوم بنقل الحرارة من وسط درجة حرارته منخفضة إلى وسط آخر درجة حرارته مرتفعة تلقائياً أو دون بذل عمل من مصدر خارجي. يمكن التعبير عن قانون الترموديناميك الثاني بالشكل التالي:

$$s_o - s_i = C_p . ln\frac{T_o}{T_i} - R . ln\frac{P_o}{P_i} \qquad (1.12)$$

من هذه العلاقة ومن معادلة الحالة نجد للإجراء الايزوانتروبي بين مقطعين *(i)* و *(o)* من جريان مستقر يمكن كتابة العلاقة التالية:

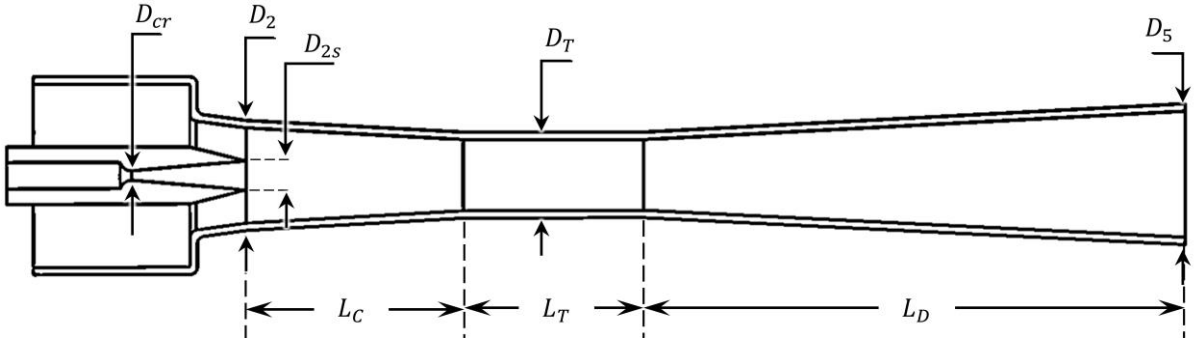
$$\frac{T_o}{T_i} = (P_o/P_i)^{\frac{k-1}{k}} = (\rho_o/\rho_i)^{k-1} \qquad (1.13)$$

يتضمن تصميم القاذف البخاري حساب أبعاد كل من الفوهة والناشر المبينة في الشكل(1-11):

1. قطر مخرج الفوهة D_{2s} الذي يحدد عدد ماخ للتيار الأولي عند مستوي مخرج الفوهة.
2. زاوية الجزء المتباعد للفوهة θ_N
3. قطر مدخل الناشر عند مستوي مخرج الفوهة D_2
4. قطر عنق الناشر D_T
5. أطوال حجرة المزج L_C وعنق الناشر L_T والجزء المتباعد للناشر L_D

يعتمد تصميم القاذف على الشروط الحدية التالية:

1. شروط التشغيل: ضغط ودرجة حرارة كل من المبخر T_e^*, P_e^* والمرجل T_1^*, P_1^*.
2. قطر عنق الفوهة D_{cr} والذي يحدد التدفق الكتلي الحرج للتيار الأولي..
3. سرعة خروج البخار من الناشر u_5.
4. الاستطاعة التبريدية المطلوبة في المبخر $\dot{Q}_e$.



الشكل(1−11): الأبعاد التصميمية الرئيسية للقاذف

1−4−1 فوهة لافال *Nozzle*

تُعرّف فوهة لافال بأنها الفوهة المتقاربة المتباعدة التي تكون فيها سرعة الجريان عند العنق مساوية لسرعة الصوت ويكون التدفق الكتلي المار عبرها عندئذٍ هو التدفق الأعظمي. يعطى شرط الفوهة المخنوقة بالعلاقة:

$$\frac{P_2}{P_1^*} < \frac{P_{cr}}{P_1^*} \quad \Rightarrow \quad \frac{P_2}{P_1^*} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1.14}$$

حيث P_2 الضغط الخلفي للفوهة ويساوي ضغط حجرة المزج.

تبين النتائج التجريبية حسب (Ruangtrakoon et al., 2011) أن الضغط الستاتيكي عند مستوي مخرج الفوهة يعادل 70% من ضغط التيار الثانوي في خط السحب:

$$P_2 = 0.7P_e^* \tag{1.15}$$

بفرض أن عملية التمدد ايزوانتروبية يمكن كتابة معادلة انحفاظ الطاقة للجريان في الفوهة كالتالي:

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_{2s'} + \frac{u_{2s'}^2}{2} \tag{1.16}$$

بالتالي فإن السرعة النظرية للتيار الأولي الخارج من الفوهة:

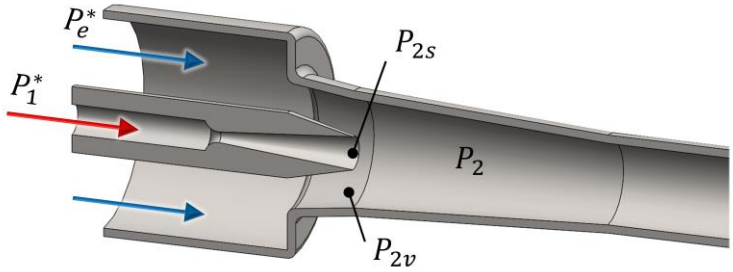
$$u_{2s'} = \sqrt{2(h_1 - h_{2s'}) + u_1^2} \tag{1.17}$$

حيث $2s'$ هي شروط الجريان الايزوانتروبي عند مخرج الفوهة.

بإهمال سرعة دخول البخار إلى الفوهة بالنسبة لسرعة خروجه منها ($u_{2s'} \gg u_1$) تصبح سرعة الجريان الايزوانتروبي عند مخرج الفوهة:

$$u_{2s'} = \sqrt{2(h_1 - h_{2s'})} = \sqrt{2C_P(T_1^* - T_{2s'})} \tag{1.18}$$

$$u_{2s'} = \sqrt{\frac{2kR}{k-1} T_1^* \left[1 - \left(\frac{P_{2s'}}{P_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \tag{1.19}$$



الشكل(1−12): الضغوط الأمامية والخلفية للفوهة

إذا كانت عملية التمدد غير عكوسة فإن ذلك يؤدي إلى ضياع حراري واحتكاكي بين السائل وجدار الفوهة يسبب انخفاض في سرعة الجريان عند مخرج الفوهة مقارنةً بالسرعة الناتجة عن التمدد الايزوانتروبي. تمثل العملية $1 \rightarrow 2s'$ في الشكل(1−13) حالة التمدد الايزوانتروبي وتمثل العملية $1 \rightarrow 2s$ التمدد الفعلي في الفوهة، يُعرّف مردود الفوهة بالعلاقة التالية:

$$\eta_N = \frac{T_1^* - T_{2s}}{T_1^* - T_{2s'}} \tag{1.20}$$

بالتالي يمكن حساب درجة حرارة التيار عند مخرج الفوهة بمعرفة مردود الفوهة، ويمكن لتبسيط العلاقات اعتبار الفوهة مثالية $\eta_n = 1$ وبالتالي يكون $T_{2s} = T_{2s'}$.

ومنه يمكن حساب السرعة الحقيقية للتيار الأولي عند مخرج الفوهة من العلاقة التالية:

$$u_{2s} = \sqrt{2C_P(T_1^* - T_{2s})} \tag{1.21}$$

ويُحسب عدد ماخ عند مخرج الفوهة من العلاقة:

$$M_{2s} = \frac{u_{2s}}{\sqrt{kRT_{2s}}} \tag{1.22}$$

في الجريان الايزوانتروبي تتحقق المعادلة:

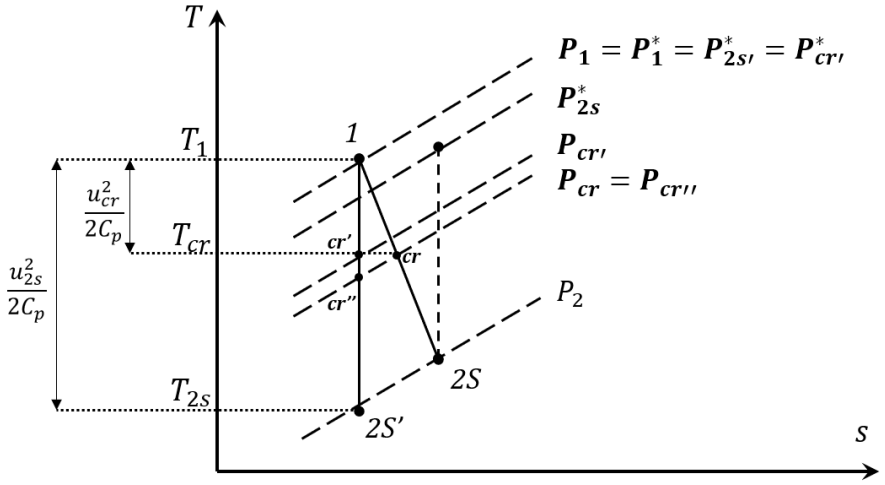
$$\frac{P_1^*}{P_{2s}} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{2s}^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1.23}$$

يمكن حساب التدفق الكتلي الحرج $\dot{m}_s$ للتيار الأولي من معادلة الاستمرار في الفوهة:

$$\dot{m}_s = \rho_{cr} u_{cr} A_{cr} \tag{1.24}$$

حيث تعطى سرعة التيار عند العنق بالعلاقة:

$$u_{cr} = \sqrt{kRT_{cr}} \tag{1.25}$$



الشكل(1−13): التمدد الايزوانتروبي والتمدد الحقيقي في الفوهة

وَ T_{cr} درجة حرارة التيار عند العنق:

$$T_{cr} = T_1^* \left(\frac{2}{k+1}\right) \tag{1.26}$$

ومن معادلة الحالة $\rho_{cr} = \frac{P_{cr}}{RT_{cr}}$ ، بالتعويض نجد علاقة التدفق الكتلي الحرج للتيار الأولي بدلالة ضغط ودرجة حرارة البخار في المرجل P_1^*, T_1^* وقطر عنق الفوهة D_{cr}:

$$\dot{m}_s = \sqrt{\frac{k}{R}} . \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} . \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} . A_{cr} \tag{1.27}$$

ومنه يتم تحديد قطر عنق الفوهة D_{cr} حسب قيمة التدفق الكتلي المطلوبة.

- المساحة النسبية للفوهة *Nozzle Area Ratio*

بتطبيق معادلة الاستمرار بين مقطع الفوهة الحرج ومخرج الفوهة:

$$\dot{m}_s = \rho_{2s} u_{2s} A_{2s} = \rho_{cr} u_{cr} A_{cr} \tag{1.28}$$

$$\Rightarrow u_{2s} = \sqrt{kRT_{cr}} \frac{P_{cr}}{P_{2s}} \frac{T_{2s}}{T_{cr}} \frac{A_{cr}}{A_{2s}} \tag{1.29}$$

بتعويض العلاقة(1.29) بالعلاقة(1.22) نجد:

$$M_{2s} = \frac{P_{cr}}{P_{2s}} \sqrt{\frac{T_{2s}}{T_{cr}}} \frac{A_{cr}}{A_{2s}} \tag{1.30}$$

$$M_{2s} = \frac{P_{cr}}{P_{2s}} \left(\frac{P_{2s}}{P_{cr}}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \frac{A_{cr}}{A_{2s}} = \left(\frac{P_{cr}}{P_{2s}}\right)^{\frac{k+1}{2k}} \frac{A_{cr}}{A_{2s}} \tag{1.31}$$

حسب العلاقة(1.14):

$$M_{2s} = \left(\frac{P_1^* \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}}{P_{2s}} \right)^{\frac{k+1}{2k}} \frac{A_{cr}}{A_{2s}} \tag{1.32}$$

$$M_{2s} = \sqrt{\left(\frac{P_1^*}{P_{2s}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \frac{A_{cr}}{A_{2s}} \tag{1.33}$$

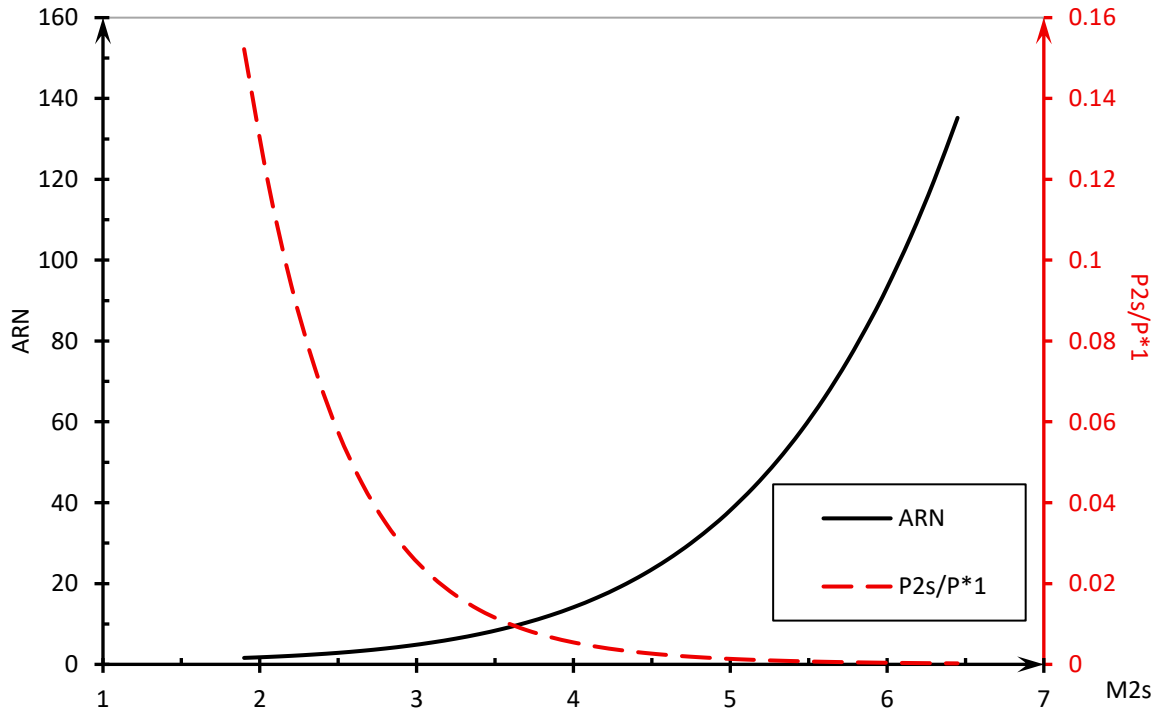
$$\frac{A_{2s}}{A_{cr}} = \frac{1}{M_{2s}} \sqrt{\left(\frac{P_1^*}{P_{2s}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \tag{1.34}$$

بتعويض المعادلة(1.23):

$$AR_N = \frac{A_{2s}}{A_{cr}} = \frac{1}{M_{2s}} \sqrt{\left[\frac{2 + (k-1)M_{2s}^2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}} \tag{1.35}$$

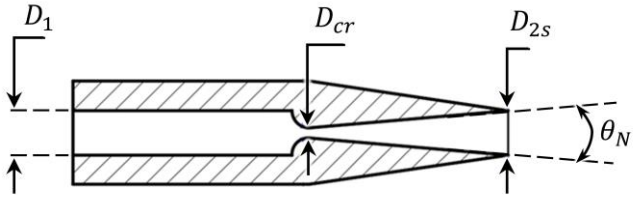
وهي علاقة المساحة النسبية للفوهة AR_N بعدد ماخ عند مخرجها M_{2s}، من هذه العلاقة يمكن حساب قطر مخرج الفوهة D_{2s} تبعاً لعدد ماخ المطلوب عند مخرج الفوهة بفرض قيمة محددة لقطر عنق الفوهة D_{cr}.

يبين الشكل(1−14) العلاقة بين كل من المساحة النسبية للفوهة AR_N ونسبة تمدد الفوهة P_{2s}/P_1^* مع عدد ماخ عند مخرج الفوهة M_{2s}، حيث المعامل الادياباتي للبخار $k = 1.327$، يتضح من الشكل أنه للحصول على عدد ماخ M_{2s} أكبر ينبغي زيادة المساحة النسبية للفوهة.



الشكل(1−14): علاقة المساحة النسبية للفوهة ونسبة تمدد الفوهة بعدد ماخ عند مخرجها

تزداد كفاءة الفوهة عند تصميم مدخلها بجدران منحنية ومخرجها بجدران مستقيمة كما يبين الشكل(1-15) بحيث تكون زاوية التباعد $\theta_N = 10°\sim20°$. *(Ruangtrakoon & Aphornratana, 2019)*



الشكل(1-15): أبعاد الفوهة

1-4-2 حجرة المزج *Mixing Chamber*

يمتزج التيار الأولي مع التيار الثانوي تحت ضغط ثابت في حجرة المزج من الحالة 2 إلى الحالة 3 حسب الشكل(1-4). يفترض أن يكون التياران ممتزجان بالكامل في عنق القاذف قبل حدوث موجة الصدمة، بتطبيق معادلة كمية الحركة:

$$(\dot{m}_s + \dot{m}_v)u_3 = \dot{m}_s u_{2s} + \dot{m}_v u_{2v} + A.dP \tag{1.36}$$

بما أن $P_2 = P_3$ فإن $A.dP = 0$ بالتالي

$$(\dot{m}_s + \dot{m}_v)u_3 = \dot{m}_s u_{2s} + \dot{m}_v u_{2v} \tag{1.37}$$

إن عملية امتزاج تيارين سائليين درجتي حرارتهما متباينتين هي عملية ترموديناميكية لاعكوسة، يؤدي ذلك إلى ضياع في الطاقة الحركية للمزيج، لذلك يتم ادخال مفهوم مردود المزج η_{mix}:

$$u_3 = \eta_{mix}\frac{u_{2s} + R_m u_{2v}}{1 + R_m} \tag{1.38}$$

يمكن اهمال الضياع في الطاقة الحركية للتبسيط، أي $\eta_{mix} = 1$

تُحسب سرعة التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة من العلاقة التالية:

$$u_{2v} = \sqrt{2C_P(T_e^* - T_{2v})} \tag{1.39}$$

بفرض أن البخار القادم من المبخر إلى مدخل حجرة المزج يتمدد ايزوانتروبياً فإن:

$$T_{2v} = T_e^*\left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} \tag{1.40}$$

تصبح علاقة سرعة التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة:

$$u_{2v} = \sqrt{2C_P T_e^*\left[1 - \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \tag{1.41}$$

يمكن حساب عدد ماخ للتيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة من العلاقة:

$$M_{2v} = \frac{u_{2v}}{\sqrt{kRT_{2v}}} \tag{1.42}$$

بعد الحصول على سرعة المزيج u_3 يمكن حساب درجة الحرارة للمزيج عند الحالة (3):

$$T_3 = T_3^* - \frac{u_3^2}{2C_p} \tag{1.43}$$

يمكن حساب درجة حرارة التوقف للمزيج T_3^* من معادلة انحفاظ الطاقة:

$$\dot{m}_s h_{2s} + \dot{m}_v h_{2v} = (\dot{m}_s + \dot{m}_v) h_3^* \tag{1.44}$$

وحيث $\Delta h = C_p \Delta T$ بالتالي:

$$T_3^* = \frac{T_{2s} + R_m T_{2v}}{1 + R_m} \tag{1.45}$$

وبالتالي يعطى عدد ماخ للمزيج عند الحالة (3) بالعلاقة التالية:

$$M_3 = \frac{u_3}{\sqrt{kRT_3}} \tag{1.46}$$

يعطى التدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v$ من معادلة الاستمرار:

$$\dot{m}_v = \rho_{2v} u_{2v} A_{2v} = \frac{P_{2v}}{RT_{2v}} u_{2v} A_{2v} \tag{1.47}$$

بتعويض العلاقتين (1.40) و (1.41) في العلاقة(1.47):

$$\dot{m}_v = \frac{P_{2v}}{RT_e^* \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \sqrt{2C_P T_e^* \left(1 - \frac{T_e^* \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{T_e^*}\right)} \cdot A_{2v} \tag{1.48}$$

$$\dot{m}_v = \frac{P_e^{*\frac{k-1}{k}} \cdot P_{2v}^{\frac{1}{k}}}{RT_e^*} \sqrt{2C_P T_e^*} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \tag{1.49}$$

$$\dot{m}_v = \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_e^*}} P_e^{*\frac{k-1}{k}} P_{2v}^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}} A_{2v} \tag{1.50}$$

وبالتالي يمكن حساب مساحة مدخل التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة:

$$A_{2v} = \frac{\sqrt{\frac{(k-1)RT_e^*}{2k}}}{P_e^{*\frac{k-1}{k}} P_{2v}^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}}} \dot{m}_v \tag{1.51}$$

حيث:

$$P_{2v} = P_{2s} = \frac{P_1^*}{\left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) M_{2s}^2\right]^{\frac{k}{k-1}}} \tag{1.52}$$

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_e}{\Delta h} \tag{1.53}$$

$\dot{Q}_e$: الاستطاعة التبريدية للمبخر

Δh: فرق الانتالبي لمدخل ومخرج المبخر عند درجة حرارة التبخر المدروسة

ومنه يمكن حساب قطر مدخل حجرة المزج عند مستوي مخرج الفوهة بالعلاقة التالية:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4A_{2v}}{\pi} + D_{2s}^2} \tag{1.54}$$

1-4-3 عنق الناشر *Diffuser Throat*

تشير الحالة 3 لشروط الجريان أمام موجة الصدمة والحالة 4 لشروط الجريان خلف موجة الصدمة حسب الشكل(1-16)، يمكن حساب بارامترات الجريان خلف موجة الصدمة بدلالة عدد ماخ أمام موجة الصدمة من خلال العلاقات التالية:

نسبة السرع:

$$\frac{u_4}{u_3} = \frac{(k-1)M_3^2 + 2}{(k+1)M_3^2} \tag{1.55}$$

نسبة الضغوط :

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{2k}{(k+1)}.M_3^2 - \frac{k-1}{k+1} \tag{1.56}$$

نسبة درجات الحرارة:

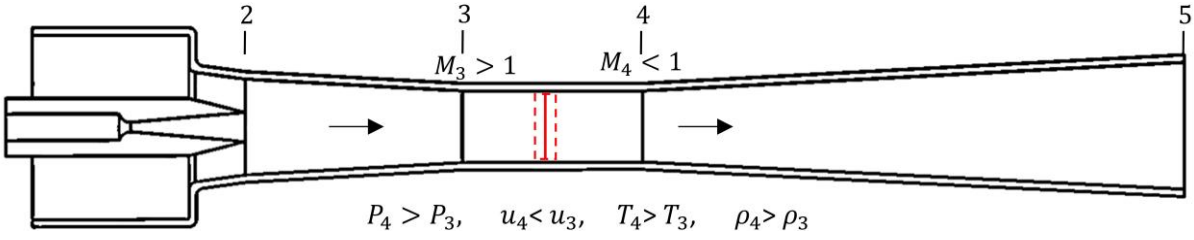
$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{P_4}{P_3}.\frac{u_4}{u_3} = \left[\frac{2k}{(k+1)}.M_3^2 - \frac{k-1}{k+1}\right] \cdot \left[\frac{(k-1).M_3^2 + 2}{(k+1).M_3^2}\right] \tag{1.57}$$

نسبة الكثافات:

$$\frac{\rho_4}{\rho_3} = \frac{(k+1).M_3^2}{(k-1)M_3^2 + 2} \tag{1.58}$$

عدد ماخ بعد موجة الصدمة العمودية بدلالة عدد ماخ قبل الصدمة:

$$M_4 = \sqrt{\frac{1 + \frac{k-1}{2}.M_3^2}{k.M_3^2 - \frac{k-1}{2}}} \tag{1.59}$$



الشكل(1-16): موجة الصدمة العمودية للجريان الايزوانتروبي في عنق الناشر

يمكن تحديد مساحة مقطع العنق من معادلة الاستمرار:

$$A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} = \frac{\dot{m}_s + \dot{m}_v}{\frac{P_3}{R.T_3} u_3} \tag{1.60}$$

تُعرّف المساحة النسبية للقاذف على أنّها نسبة مساحة مقطع عنق الناشر إلى مساحة مقطع عنق الفوهة AR_T إحدى البارامترات الهندسية المستخدمة في تقييم أداء القاذف بربطها مع بارامترات التشغيل، والتي تُعطى بالعلاقة التالية:

$$AR_T = \frac{A_T}{A_{cr}} \tag{1.61}$$

1-4-4 الجزء المتباعد من الناشر *Divergent Section of Diffuser*

يتباطئ الجريان في الناشر ويزداد الضغط الستاتيكي في الجزء المتوسع منه إلى أن يصل إلى شروط التوقف وتتحول الطاقة الحركية للجريان إلى طاقة ضغط، تكون عملية الانضغاط الفعلية في الناشر غير عكوسة ينتج عنها ضياع في ضغط التوقف كما يوضح الشكل(1-17)، يعطى مردود الجزء المتوسع من الناشر بالعلاقة:

$$\eta_D = \frac{T_{5'} - T_4}{T_5 - T_4} \tag{1.62}$$

عملياً يتم تصميم الناشر بحيث تكون سرعة التيار عند مخرجه $30 \sim 50 \frac{m}{s}$ ، بالتالي يمكن حساب درجة حرارة المزيج عند المخرج من العلاقة:

$$T_5 = T_5^* - \frac{u_5^2}{2C_p} \tag{1.63}$$

حيث $T_5^* = T_4^* = T_3^*$.

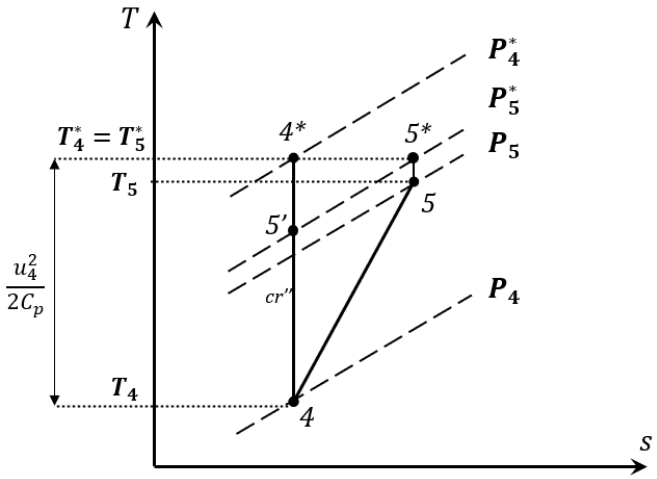
بمعرفة مردود الجزء المتوسع يمكن حساب درجة حرارة المزيج عند مخرج الناشر بالحالة الايزوانتروبية $T_{5'}$.

باعتبار الانضغاط ايزوانتروبي يمكن حساب $P_{5'}$ من العلاقة التالية:

$$\frac{P_{5'}}{P_4} = \left(\frac{T_{5'}}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1.64}$$

يتبين من الشكل(1-17) أنّ $P_{5'} = P_5^*$، بالتالي يُحسب الضغط عند مخرج الناشر من العلاقة:

$$\frac{P_5^*}{P_5} = \left(\frac{T_5^*}{T_5}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1.65}$$



الشكل(1−17): الانضغاط الايزوانتروبي والانضغاط الحقيقي في في الجزء المتباعد من الناشر

بالتالي تُحسب مساحة مقطع مخرج الناشر من العلاقة التالية:

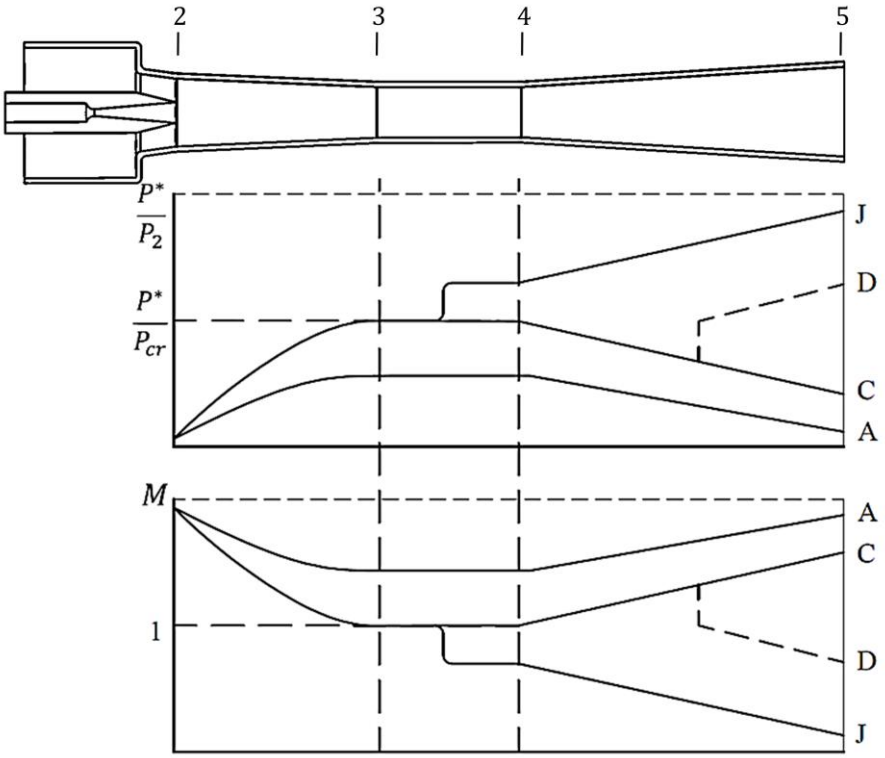
$$A_5 = \frac{\dot{m}_s + \dot{m}_v}{\frac{P_5}{R.T_5}.u_5} \tag{1.66}$$

يبقى الجريان فوق صوتي عند مخرج الناشر إذا لم يرتفع ضغط التكاثف الى قيمة معينة $(P_c^* > P_{cr})$ متمثلة بالمنحني A في الشكل(1−18)، تحدث عندها موجة صدمة تنقل الجريان من فوق صوتي الى تحت صوتي. كلما ارتفع ضغط التكاثف تنزاح موجة الصدمة نحو المقطع الثابت من الناشر المتمثلة بالمنحني J بالتالي حتى يتحول جريان المزيج في حجرة المزج من جريان فوق الصوتي الى تحت صوتي قبل وصوله الى الجزء المتباعد من الناشر يجب أن يتحقق الشرط التالي:

$$\frac{P_c^*}{P_2} > \frac{P_{cr}}{P_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{P_c^*}{P_2} > \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1.67}$$

حسب العلاقة(1.15):

$$\frac{P_c^*}{0.7\ P_e^*} > \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1.68}$$



المنحني *A*: جريان تحت صوتي على كامل القاذف

المنحني *C*: جريان تحت صوتي في حجرة المزج وصوتي في العنق ومن ثم يعود تحت صوتي في الجزء المتباعد من الناشر

المنحني *J*: جريان يتعرض لموجة صدمة عمودية في عنق الناشر يحوّل الجريان من تحت صوتي في حجرة المزج الى فوق صوتي عند مخرج الناشر

المنحني *D*: جريان يتعرض لموجة صدمة عمودية في الجزء المتباعد من الناشر يحوّل الجريان من تحت صوتي الى فوق صوتي

الشكل(1−18): تغير خصائص الجريان وحيد البعد الايزوانتروبي على طول القاذف

الفصل الثاني

الدراســـات المرجعيـــة

Literatures

يتم تصميم القاذف البخاري فوق الصوتي المستخدم في تطبيقات التبريد باستخدام العلاقات الترموديناميكية النظرية من أجل شروط تشغيل محددة. يُستخدم ديناميك السوائل الحاسوبي من أجل تحسين أداء القاذف الذي ينعكس على أداء دارة التبريد بشكل عام، حيث تعتبر وسيلة فعّالة في تصميم واختبار القاذف البخاري وتحليل حقل الجريان *(Ruangtrakoon & Aphornratana, 2019)*. درست الأبحاث السابقة تأثير كل من شروط التشغيل والتصميم الهندسي على أداء القاذف البخاري تجريبياً. تتضمن شروط التشغيل ضغوط الاشباع لكل من المرجل والمبخر والمكثّف. وضّحت هذه الدراسات أنّ زيادة ضغط المرجل يؤدي إلى انخفاض نسبة السحب الكتلي لكن تزداد قدرة القاذف على مقاومة ضغوط التكاثف المرتفعة أي يزداد ضغط التكاثف الحرج. يمكن التحكم بتدفق التيار الأولي باستخدام ابرة قابلة للضبط محورياً عند مدخل الفوهة عند شروط تشغيل محددة، تعطي هذه الطريقة نتائج أفضل بالمقارنة مع التحكم بالتدفق من خلال تغيير ضغط المرجل. تزداد نسبة السحب الكتلي مع ارتفاع درجة حرارة التبخر من أجل درجة حرارة تكاثف ومرجل ثابتين، أكّدت الأبحاث على أهمية الدقة في قياس ضغط التبخر لأن أي انحراف صغير في قياسه يؤدي إلى انحرافات ملحوظة في أداء القاذف. *(Ariafar et al., 2015; Dvorak & Safarik, 2005; Eames et al., 2007; Keenan et al., 1950; Kong et al., 2015; Lamberts, Chatelain, & Bartosiewicz, 2018; Y. Li & Yu, 2019; Lu et al., 2023; Rand et al., 2023; Ruangtrakoon & Aphornratana, 2014; Tang et al., 2019; Varga et al., 2011; R. L. Yadav & Patwardhan, 2008; Zhang et al., 2014; Zhu & Jiang, 2014)*. كما تزداد نسبة السحب الكتلي مع ازدياد كل من نسبة التمدد P_1^*/P_e^* ونسبة مساحة عنق الناشر إلى مساحة عنق الفوهة A_T/A_{cr} ومع انخفاض نسبة الانضغاط P_c^*/P_e^* حسب *(Sankarlal & Mani, 2007)*، لأن ازدياد نسبة التمدد يؤدي إلى ازدياد سرعة التيار الأولي الخارج من الفوهة مما يُسهم في زيادة نسبة السحب نتيجة انخفاض الضغط. وُجد أن نسبة المساحة الأمثل للقاذف تزداد خطياً مع ازدياد درجة حرارة المرجل ضمن شروط التشغيل المدروسة (Yapici et al., 2008).

يؤدي الشكل الهندسي للفوهة دوراً كبيراً في أداء القاذف وبالتالي على معامل أداء دارة التبريد. يؤدي استخدام فوهات ذات قطر عنق صغير إلى زيادة نسبة السحب الكتلي وانخفاض ضغط التكاثف الحرج كما أن إزاحة الفوهة نحو الخلف يؤدي إلى النتائج ذاتها. يبقى عدد ماخ عند مخرج الفوهة ثابتاً اذا كانت نسبة المساحة للفوهات ذاتها من أجل أقطار مختلفة للفوهة وثبات شروط التشغيل. يزداد عدد ماخ عند مخرج الفوهة كلما كانت مساحة مخرج الفوهة أكبر مع ثبات شروط التشغيل ويبقى التدفق الكتلي للتيار الأولي ثابتاً. *(Besagni & Inzoli, 2017; Feng et al., 2022; Han et al., 2019; A. Kumar et al., 2024; Ruangtrakoon et al., 2013; Rusly et al., 2005; Samaké et al., 2016; Sriveerakul et al., 2007a)*. تم تلخيص تأثير الشكل الهندسي للفوهة وموضعها بشكل واضح ومفصّل من قِبل *(Chunnanond & Aphornratana, 2004a; A. Li et al., 2019; Lin et al., 2013; Ruangtrakoon et al., 2011; Ruangtrakoon &*

Aphornratana, 2014) ، إنّ موضع مخرج الفوهة الأمثل لا يتناسب فقط مع قطر عنق القاذف ولكنه يزداد أيضاً مع ارتفاع ضغط التيار الأولي. يقدم (*Duan et al., 2023*) تحليلاً شاملاً لكيفية تأثير البارامترات الهندسية على الأداء حيث أشار البحث إلى امكانية أن يكون مخرج الفوهة قريباً من موضعها الأمثل ضمن مجال انحراف محدد، يؤدي الانحراف عن قيمة موضع مخرج الفوهة المثلى إلى انخفاض بنسبة السحب الكتلي بمقدار 12.4%، في حين يجب أن تكون المساحة النسبية للقاذف بقيمتها المثلى لضمان كفاءة عالية لتشغيل القاذف. باستخدام فوهة قابلة للتحريك تم تحديد آليتين مختلفتين للاختناق حسب *(Kracik & Dvorak, 2022)*، أظهرت النتائج أنه يمكن تغيير موضع الفوهة للتأثير على اختناق التدفق الثانوي وبالتالي تحقيق مجالات عمل مختلفة مع الحفاظ على ظروف التشغيل ثابتة، حيث يمكن أن يصل التيار الثانوي إلى السرعة الصوتية قبل دخوله حجرة المزج بالاضافة الى امكانية حدوث الاختناق في حجرة المزج تبعاً لموضع مخرج الفوهة. قد تكون هذه النتائج بمثابة أساس لفهم اختناق الجريان في القواذف فوق الصوتية.

أجريت العديد من الأبحاث لتحديد التصميم الأمثل للفوهة فمثلاً كانت نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.4$ باستخدام الفوهة ذات الجدران المنحنية في أنظمة التبريد الامتصاصية، والتي كانت أعلى بنسبة 4.9% و 7% من نسب السحب الكتلي باستخدام الفوهات ذات الجدران المستقيمة والمقعرة على التتالي، إلّا أنّ الفوهة المقعرة أبدت استقراراً أفضل للجريان ولنسبة الانضغاط (*Mukhtar et al., 2024*). قام (*Tavakoli et al., 2023*) بدراسة جدوى استخدام مذبذب سائلي *fluidic oscillator* كفوهة في القواذف تحت الصوتية ووجدوا أن نسبة السحب الكتلي ازدادت بنسبة 38.3% بوجود المذبذب كما أنه أدى الى توسيع مجال عمل القاذف من ناحية ضغط التكاثف.

من ناحية أخرى تم اجراء عدة ابحاث تجريبية وعددية لتحديد الشكل الهندسي الأمثل لحجرة المزج حيث حصل (Samsam-Khayani et al., 2023) على نسبة سحب كتلي مقدارها 1.06 بشروط تشغيل محددة محققاً تحسيناً في الأداء بمقدار 33%. خَلُصت الأبحاث إلى أنّ أداء القاذف يتأثّر بشدّة بزاوية حجرة المزج حيث كلما كان ضغط التيار الأولي أكبر يُفضّل أن تكون زاوية حجرة المزج كبيرة. يمكن أن يختلف معدل السحب بنسبة تصل إلى 26.6% باختيار زاوية حجرة المزج المناسبة. تكمن أهمية هذه النتائج في أنه يمكن استخدامها لتعديل موضع مخرج الفوهة من أجل الحصول على أفضل أداء عندما تتغير شروط التشغيل *(Chen et al., 2011; Chou et al., 2001; Dong et al., 2020; Haghparast et al., 2018; Huang et al., 1985; Ramesh & Sekhar, 2017; Zhu et al., 2009)*. بينت الأبحاث وجود سلسلتين من موجات الصدمة المائلة في القاذف: الأولى بعد مخرج الفوهة في حجرة المزج والثانية في عنق القاذف قبل بداية الجزء المتباعد من الناشر، بينت النتائج أن مكان حدوث موجة الصدمة المائلة الثانية له تأثير مهم على أداء القاذف حيث يعتمد مكان حدوثها على ضغط التكاثف الحرج فكلما كان أكبر انزاحت موجة الصدمة الثانية نحو الجزء المتباعد للناشر.

فيما يتعلق بمردود القاذف، أجريت دراسات موسعة حول تأثير قطر عنق الناشر وطول حجرة المزج وزاوية المقطع المتباعد من الناشر، تبيّن أن مردود القاذف يصل إلى قيمة عظمى عند ضغوط مرتفعة، أشارت الأبحاث (*Banasiak et al., 2012; NAKAGAWA et al., 2010; Nakagawa et al., 2011*) إلى القيم المثلى لهذه الأبعاد الهندسية. يتعلق المردود بشروط التشغيل وبنسبة الحرارة النوعية أو المعامل الادياباتي k وكما أن نسبة السحب الكتلي تتعلق بدرجة حرارة المرجل فإن مردود القاذف يزداد بشكل ملحوظ من $\eta_{min} = 0.08$ إلى $\eta_{max} = 0.165$ ضمن مجال درجات حرارة المرجل $50\ ℃ < T_1^* < 55\ ℃$ قبل أن ينخفض إلى قيمة صغرى. وقد وجد أنه لا يوجد تأثير لموضع الفوهة على مردود القاذف ضمن شروط التشغيل المدروسة في (*Butrymowicz et al., 2014*).

تكشف الدراسات والأبحاث السابقة عن الجهود المبذولة من أجل تحسين أداء القواذف من خلال دراسة الشكل الهندسي للتصميم التقليدي حيث تكون حجرة المزج ذات جدار مستقيم لكن لا توجد أبحاث تدرس الشكل المنحني لجدار حجرة المزج. تهدف هذه الدراسة إلى سد هذه الفجوة من خلال تحليل منهجي لتأثير حجرة المزج المنحنية على أداء القاذف والتعمق في فهم ظاهرة الاختناق.

تتمثل أصالة هذه الدراسة في اقتراح حجرة المزج المنحنية كحل لتحسين الأداء والتي تم تطويرها والتحقق من صحتها باستخدام ديناميك السوائل الحاسوبي. يتم التأكيد على أصالة هذا البحث من خلال تأكيد تحسين الأداء للقواذف البخارية فوق الصوتية حيث يعتبر هذا البحث هو الأول الذي يقترح حجرة المزج ذات الجدران المنحنية كتصميم بديل للتصميم التقليدي.

الفصل الثالث

ديناميك السوائل الحاسوبي لنمذجة وتحليل حقل الجريان في القاذف البخاري

Computational Fluid Dynamics for Modelling and Analysing the Flow Field within a Steam Ejector

بيّنت الأبحاث أن تقنية ديناميك السوائل الحاسوبي *Computational Fluid Dynamics (CFD)* أداة فعّالة لنمذجة الجريان في القاذف وتطوير أدائه من خلال تغيير الشروط التشغيلية وتعديل الشكل الهندسي للقاذف بدراسة التدرجات اللونية للبارامترات وتوضيح المتغيرات بيانياً *(Allouche et al., 2014; Dvorak & Safarik, 2003; Fan et al., 2011; Gagan et al., 2014; Y. Li et al., 2023; Wang et al., 2014)* . تخفّض هذه التقنية من تكاليف الأبحاث التجريبية وتعطي مؤشراً نحو التصميم الهندسي الأمثل للقاذف (Cai et al., 2012; Zheng et al., 2012).

يعرض هذا الفصل التحقق الحاسوبي من التصميم الهندسي للقاذف البخاري الذي تم حساب أبعاده باستخدام العلاقات الرياضية الناظمة للجريان الايزوانتروبي في دارات التبريد القاذفة للبخار العاملة على بخار الماء من أجل درجات حرارة المرجل 110~160℃ ودرجات حرارة تبخر 5~15℃ حيث تم التحقق حاسوبياً من 12 قاذف مصمم ضمن هذه الشروط باستخدام برنامج *ANSYS*. إنّ برنامج *ANSYS* هو برنامج محاكاة هندسي شامل تُستخدم فيه تقنية الحجوم المنتهية وديناميك السوائل الحاسوبي وغيرها من عمليات المحاكاة في مجالات متعددة. يساعد هذا البرنامج في التنبؤ بعمل النماذج الهندسية على أرض الواقع مما يقلل الحاجة إلى النماذج الأولية الفيزيائية والقدرة على التصميم بشكل أسرع وأكثر كفاءة.

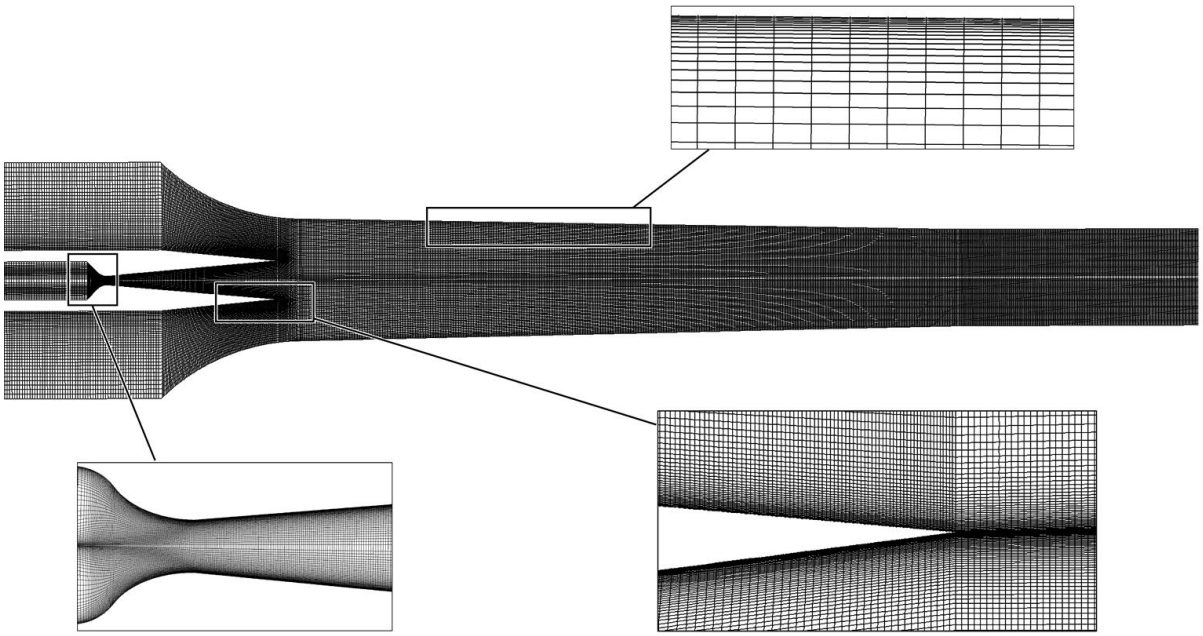
من أجل نمذجة حقول الجريان في مختلف تطبيقات ميكانيك السوائل وانتقال الحرارة، تحوّل طريقة الحجوم المنتهية المعادلات الناظمة للجريان الى معادلات جبرية عن طريق تقسيم المجال الفيزيائي إلى عدد من العناصر متعددة السطوح. يتم تقريب التكامل السطحي من خلال جمع التدفقات التي تَعبُر سطوح حجم التحكم بحيث يمكن حل هذه المعادلات عددياً.

3-1 تحديد الشبك الأمثل *Mesh sensitivity analysis*

تم استخدام برنامج *ANSYS Mesh* وهو برنامج ضمن بيئة *ANSYS Workbench* يعمل على إنشاء شبكات ذات جودة عالية من أجل طريقة الحجوم المنتهية وديناميك السوائل الحاسوبي، ويوفّر إمكانية إنشاء شبكات آلية وذكية مما يضمن حلولاً دقيقة وفعّالة. يدعم البرنامج أنواعاً مختلفة من الشبكات منها الشبكات رباعية السطوح البسيطة والشبكات متعددة السطوح وسداسية السطوح المعقدة.

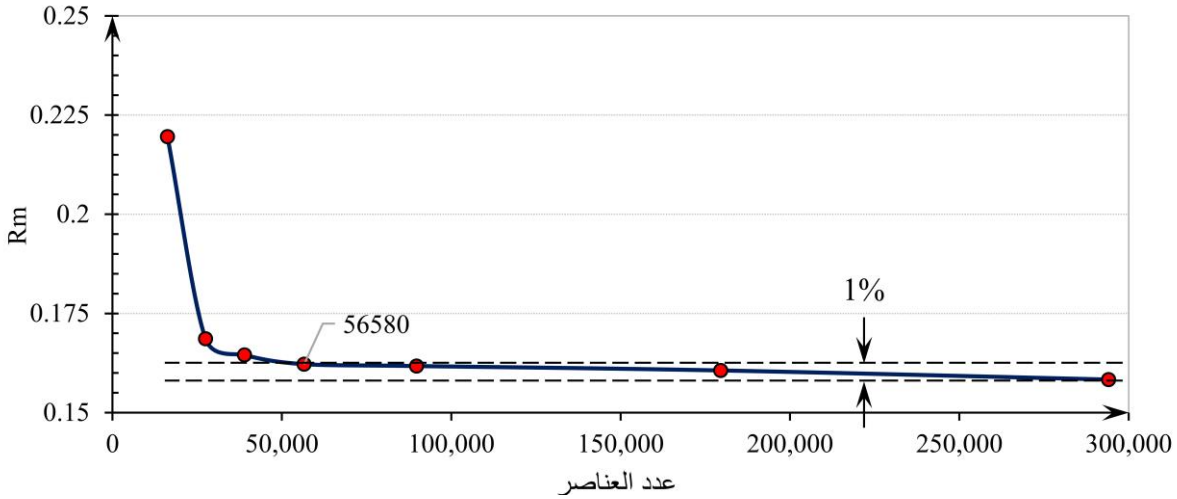
تم رسم حقل الجريان ثنائي الأبعاد باستخدام برنامج *Solidworks* أولاً ثم تصديره إلى برنامج *ANSYS Fluent* ، وبعدئذٍ يُقسّم الى حجوم منتهية من خلال انشاء الشبك *Mesh*، تم اختيار عناصر الشبك بحيث تأخذ شكلاً رباعي الأضلاع. يتم إجراء اختبار حساسية الشبك لتقييم استقلال الشبك للنتائج العددية. يركز هذا البحث بشكل أساسي على أداء القاذف، والذي يتم تقييمه من خلال التغييرات في نسبة السحب الكتلي لذلك يتم استخدام هذه النسبة كبارامتر وظيفي لاختبار الحساسية. تم تكثيف الشبك في المناطق التي تحدث فيها موجات الصدمة

ومنطقة طبقة القص في حجرة المزج وجدران الفوهة والناشر حيث يتدفق التياران الأولي والثانوي لحساب التغيرات في الضغط بدقة وضمان نتائج محاكاة دقيقة كما يبين الشكل(3−1).



الشكل(3−1): الشبك

يتم إجراء التحليل في شروط تشغيل محددة هي ضغط المرجل $P_s = 618\ [kPa]$ وضغط التبخر $P_v = 0.8\ [kPa]$ وضغط التكاثف $P_c = 6\ [kPa]$. يتم اختبار سبعة بنى مختلفة من العناصر الرباعية مع نسب السحب الكتلي الناتجة عن كل منها والتي تم الحصول عليها عددياً، كما هو موضح في الشكل(3−2). يتم ملاحظة انخفاض واضح في نسب السحب الكتلي مع زيادة عدد عناصر الشبك حتى تبلغ حوالي 50000 عنصر، ينخفض التغير في نسبة السحب مع زيادة عدد العناصر عن هذا الحد ويكون الفرق أقل من 1%، اتّبع هذه الطريقة (*Al-Rbaihat et al., 2023*). لذلك يتم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام شبك يتكون من حوالي 50000 إلى 60000 عنصر مع قياس عنصر أقصى $0.2\ [mm]$ للحفاظ على الدقة بأقصر زمن.



الشكل(3−2): علاقة نسبة السحب الكتلي مع عدد عناصر الشبك

لتحقيق قيم $y^+<1$ لنموذج الاضطراب المستخدم k-ω-SST ، يتم تكثيف الشبك بالقرب من الجدران لالتقاط تفاصيل الطبقة الحدية بدقة. لذلك تُستخدم 8 طبقات حدية بنمو متدرّج مقداره 1.4 يساعد في التحكم في قيمة y^+ وبالتالي في حل المنطقة القريبة من الجدران بدقة. تضمن المراقبة المستمرة لقيم y^+ أثناء المحاكاة بقائها ضمن المجال المطلوب وبالتالي الحفاظ على موثوقية ودقة المحاكاة. يوضح الجدول(3–1) معايير جودة الشبك المتخذة في الدراسة.

الجدول(3–1): معايير جودة الشبك

معيار الجودة	القيمة
Aspect ratio	*Max.7.47* *Avg. 1.5*
Skewness	*Max. 0.51* *Avg. 0.018*
Orthogonal quality	*Min. 0.69* *Avg. 0.99*
Element quality	*Avg. 0.907*

3–2 اعداد برنامج *Fluent*

إنّ برنامج *ANSYS Fluent* هو برنامج ديناميك سوائل حاسوبي فعّال يُستخدم لمحاكاة حقول جريان السوائل وانتقال الحرارة وتداخلات حقول الجريان في السوائل حيث يوفّر نماذج فيزيائية متقدمة وواجهة تفاعليّة قابلة لتغيير الاعدادات والخصائص من أجل تحليل مجموعة واسعة من الظواهر الفيزيائية في السوائل. يُستخدم برنامج *Fluent* في مجالات هندسية متعددة منها صناعة السيارات ومحاكاة الفضاء والطاقة من أجل تحسين أداء المنتج وتحديد التصميم الأمثل له.

تم تعريف حقل الجريان في برنامج *Fluent* على أنه حقل اسطواني متناظر محورياً *axisymmetric* والجريان بحالة مستقرة *steady state*، أثبتت نتائج المحاكاة من النماذج المحورية ثنائية الأبعاد والنماذج ثلاثية الأبعاد في الأبحاث التي قام بها (*Besagni et al., 2021; Pianthong et al., 2007*) أنها متطابقة تقريباً لذلك تم اعتماد النموذج المحوري ثنائي الأبعاد لهذه الدراسة العددية. تم استخدام طريقة الحل المعتمدة على أساس تغير الكثافة *density-based implicit solver* والذي يناسب الجريانات القابلة للانضغاط فوق الصوتية وتم تقريب الحدود الى المرتبة الثانية *second order upwind*. إن نموذجي الاضطراب k-ω-sst و k-ε الأكثر ملائمةً لحقول الجريان فوق الصوتية. يتنبأ النموذج k-ε بمعدل الانتشار للفوهات النفاثة ويعطي نتائجاً دقيقة للجريانات التي تحتوي انفصالاً في الطبقة الحدية الناتجة عن تدرجات الضغط المنعكسة، في حين يتنبأ النموذج k-ω-sst بمعدل انتشار الجريانات الحرّة المعرّضة لاجهادات القص الكبيرة في الفوهات وفي طبقات المزج ذات اجهادات القص الكبيرة (ANSYS Fluent User Guide, *n.d.*). قدّم *(Besagni & Inzoli, 2017)* دراسة عددية للجريان في القاذف فوق الصوتي بهدف تقييم نماذج الاضطراب لمحاكاة الجريان في القواذف التي تُستخدم

في أنظمة التبريد. تمت مقارنة سبع نماذج اضطراب ضمن طريقة رينولدز المثقّلة لمعادلات نافييه – ستوكس *(RANS)* وهي: *Spalart _ Allmaras, k_ε standard, k_ε_RNG, k_ε_realizable, k_ω, k_ω_sst, RSM*. بيّن تطابق النتائج العددية مع النتائج التجريبية أن نموذج الاضطراب *k-ω-sst* هو الأفضل للقواذف البخارية فوق الصوتية من غيره من النماذج في التنبؤ بالبارامترات المختلفة، كما أنّ غالبية الأبحاث اعتمدت هذا النموذج في الحل لأنه أعطى نتائج أكثر دقة (Bartosiewicz et al., 2005; Ruangtrakoon et al., 2013). لذلك استُخدم نموذج الاضطراب *k-ω-sst* لنمذجة الجريان المضطرب بالإضافة إلى أنه تم تعريف الطبقة الحدية قرب الجدران ضمناً في النموذج *k-ω-sst* المستخدم لأنه يتضمن شرط الالتصاق للجريان بالقرب من الجدران. تم توضيح الإعدادات المستخدمة في النموذج الحاسوبي بشكل مفصل في الجدول(3–2).

الجدول(3–2): اعدادات برنامج *Fluent* المستخدمة في الدراسة

البارامتر	القيم
Solver	*Density-based*
Model 2D space	*Axisymmetric*
Temporal dimension	*Steady*
Equation of energy	*On*
Turbulence model	*k-ω-SST*
Material	*Water vapor (Density: Ideal gas)*
Formulation	*Implicit*
Flux type	*AUSM*
Spatial discretization	*Gradient: Least squares cell based* *Flow: First order upwind* *Turbulence kinetic energy: Second order upwind* *Specific Dissipation reate: Second order upwind*
Courant number	*Ranges from 0.5 to 20*
Residuals	$<10^{-9}$
Initialization method	*Standard (Relative to Cell Zone)*
Maximum iterations	*20000*

3–2–1 الشروط الحدية وخصائص سائل التشغيل *Boundary condition and fluid properties*

إنّ سائل التشغيل المستخدم هو بخار الماء حيث تم اعتباره غاز مثالي لأن الضغط المطلق في القاذف في دارات التبريد منخفض جداً وفي هذه الحالة يكون سلوك الغاز الحقيقي قريب جداً من سلوك الغاز المثالي (*Ruangtrakoon et al., 2013*). يبين الجدول(3–3) خصائص سائل التشغيل المتوفرة في قاعدة بيانات برنامج *Fluent*.

الجدول(3−3): خصائص سائل التشغيل

الخاصية	القيمة
اللزوجة *(kg/m.s)*	1.34×10^{-5}
الموصلية الحرارية *(W/m.K)*	0.0261
السعة الحرارية *(J/kg.K)*	2014

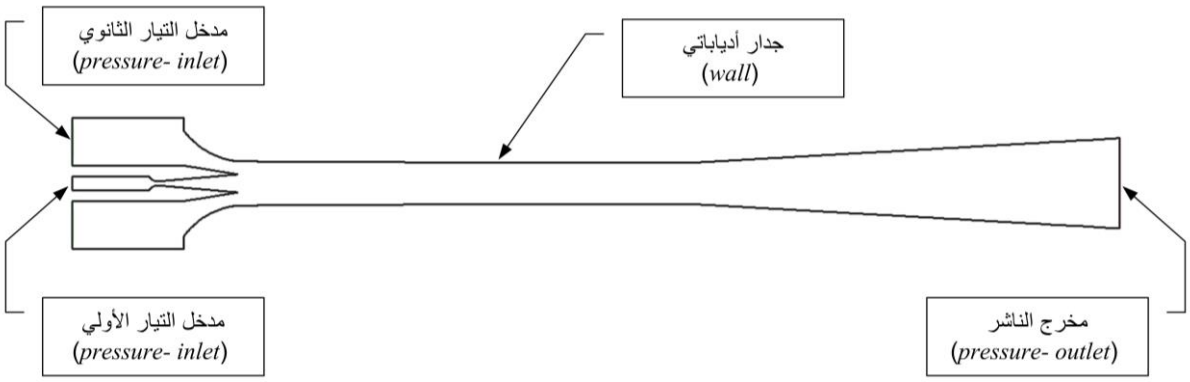
تم تعريف حدود القاذف كما يبين الشكل(3−3) حيث تم ضبط مداخل القاذف ومخرجه في برنامج *Fluent* على أساس قيمة الضغط (*pressure inlet, pressure outlet*). تم ضبط الشروط الحدية في مجمل الدراسة كما يلي:

- مدخل التيار الأولي (*pressure- inlet*): يتراوح الضغط المطلق $[kPa]$ 270~791 وهو الضغط الموافق لدرجات حرارة الاشباع للبخار في المرجل 130~170 ℃ .
- مدخل التيار الثانوي (*pressure- inlet*): يتراوح الضغط المطلق $[kPa]$0.872~1.705 وهو الضغط الموافق لدرجات حرارة الاشباع للبخار في المرجل 5~15 ℃.
- مخرج الناشر (*pressure- inlet*): يتم إدخال قيمة ضغط التكاثف بحيث تبقى أقل من قيمة ضغط التكاثف الحرج.
- جدران القاذف أدياباتية أي لا وجود للتبادل الحراري مع الوسط المحيط لأن تأثير انتقال الحرارة على الحل مهمل (*Eames et al., 1995*).

يبين الجدول(3−4) درجات حرارة التشغيل وضغوط الاشباع الموافقة.

الجدول(3−4): ضغوط التشغيل ودرجات الحرارة الموافقة لها

	بارامترات المبخر				بارامترات المرجل					
t [℃]	5	7.5	10	15	110	120	130	140	150	160
P $[kPa]$	0.872	1.036	1.228	1.705	143.27	198.53	270.08	361.28	475.84	617.82



الشكل(3−3): الشروط الحدية

3-2-2 معايير تقارب الحل *Convergence criteria*

تم اعتماد المعيارين التاليين كمعياري تقارب للحل:

1- الفرق بين التدفق الكتلي الداخل الى القاذف أي مجموع التدفقين الكتليين للتيار الأولي والتيار الثانوي والتدفق الخارج منه من مرتبة $10^{-11}\ kg/s$، وبذلك يمكن التأكد من أنّ معادلة الاستمرار محققة.

2- يجب أن يكون كل جذر من الحل أقل من 10^{-7} بعد انتهاء عملية التكرار *(iteration)*

3-3 مقارنة نموذج الغاز المثالي ونموذج الغاز الحقيقي *Ideal gas and real gas models*

على الرغم من أن نموذج الغاز المثالي يُظهر بعض الفروقات في النتائج مقارنةً بنموذج الغاز الحقيقي إلا أنّ هذه الفروق مهملة عند ضغوط التشغيل المنخفضة وخاصّةً بالنسبة للبخار المحمّص. وجدت الدراسات السابقة أن نتائج المحاكاة باستخدام نموذج الغاز المثالي تتوافق جيدًا مع النتائج التجريبية *(Aphornratana & Eames, 1997; García Del Valle et al., 2012; Sriveerakul et al., 2007a)*، وعند مقارنة القيم التجريبية بكل من نتائج محاكاة الغاز المثالي والغاز الحقيقي، يمكن استنتاج أن نموذج الغاز المثالي قدم نتائج أكثر ملائمةً مع هذه النتائج (*Ariafar et al., 2015*). يبين الجدول(3-5) مقارنة نسب السحب الكتلي وضغوط التكاثف الحرجة حسب نموذجي الغاز المثالي والغاز الحقيقي (نموذج *Peng-Robinson*). تمثّل معادلة الحالة لنموذج *Peng-Robinson* الخصائص الترموديناميكية لبخار الماء بدقة خاصةً في شروط الضغط العالي. يتم اعتماد هذا النموذج على نطاق واسع في الصناعة لنمذجة السوائل مثل بخار الماء نظراً لوثوقيته ودقته *(Stryjek & Vera, 1986)*. أجريت هذه الدراسة لثلاث قيم لضغط المرجل: $[kPa]$ 476, $[kPa]$ 361, $[kPa]$ 270، والتي تتوافق مع درجات حرارة الاشباع 130 ℃, 140 ℃, 150 ℃ على التتالي. وكان ضغط المبخر $[Pa]$ 800. يقع الخطأ بين النموذجين ضمن مجال 0.9%~1.58% لنسبة السحب الكتلي و 3.57%~5.97% للضغط الخلفي الحرج، وهي قيم مقبولة.

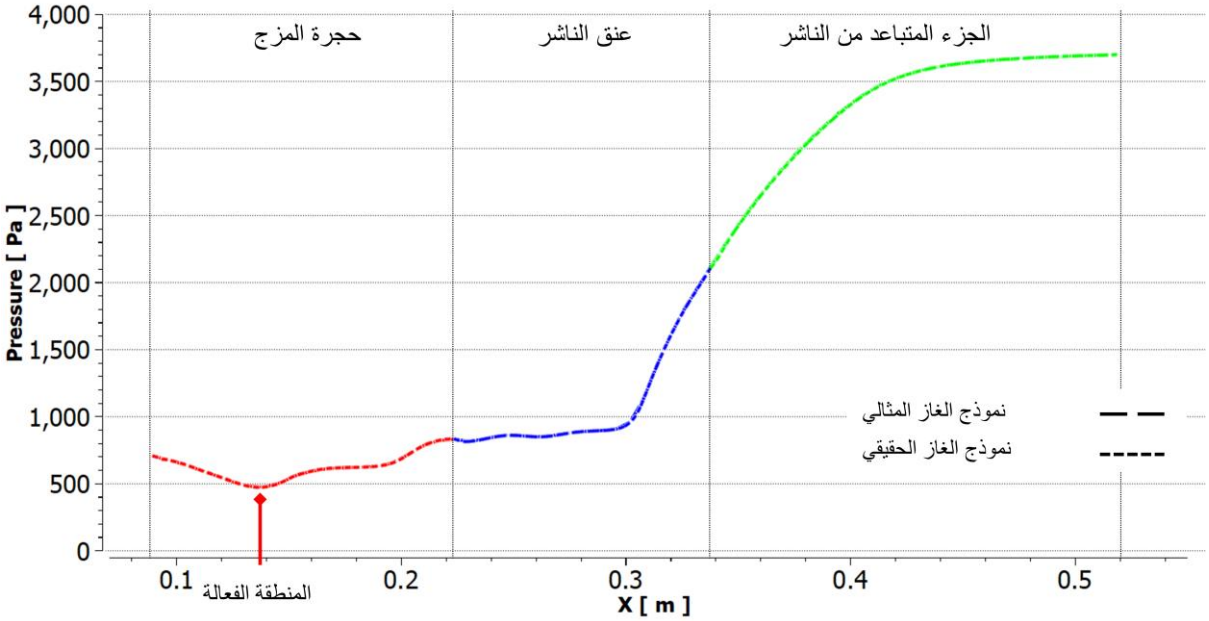
الجدول(3-5): نتائج المحاكاة الحاسوبية لنموذج الغاز المثالي ونموذج الغاز الحقيقي

البارامتر	T_1 ℃	نموذج الغاز المثالي	نموذج الغاز الحقيقي	الخطأ النسبي
R_m	*130*	*0.4497*	*0.4457*	*-0.90%*
	140	*0.3252*	*0.3213*	*-1.20%*
	150	*0.2283*	*0.2247*	*-1.58%*
$P_{c,cr}$ $[Pa]$	*130*	*3350*	*3150*	*-5.97%*
	140	*4300*	*4100*	*-4.65%*
	150	*5600*	*5400*	*-3.57%*

الخطأ(%) = 100 × (بارامتر نموذج الغاز الحقيقي – بارامتر نموذج الغاز المثالي) / بارامتر نموذج الغاز المثالي

يقارن الشكل(3-4) بين الضغط الستاتيكي عند الجدار المحسوب بواسطة نموذجي الغاز المثالي والغاز الحقيقي من أجل ضغط مرجل $[kPa]$ 361، وضغط المبخر $[Pa]$ 800، وضغط تكاثف $[Pa]$ 3700 .

يتبين من الشكل أن الضغط الستاتيكي لكلا النموذجين متطابق وبالتالي موضع اختناق التيار الثانوي متطابق، لذلك يتم اعتماد نموذج الغاز المثالي.



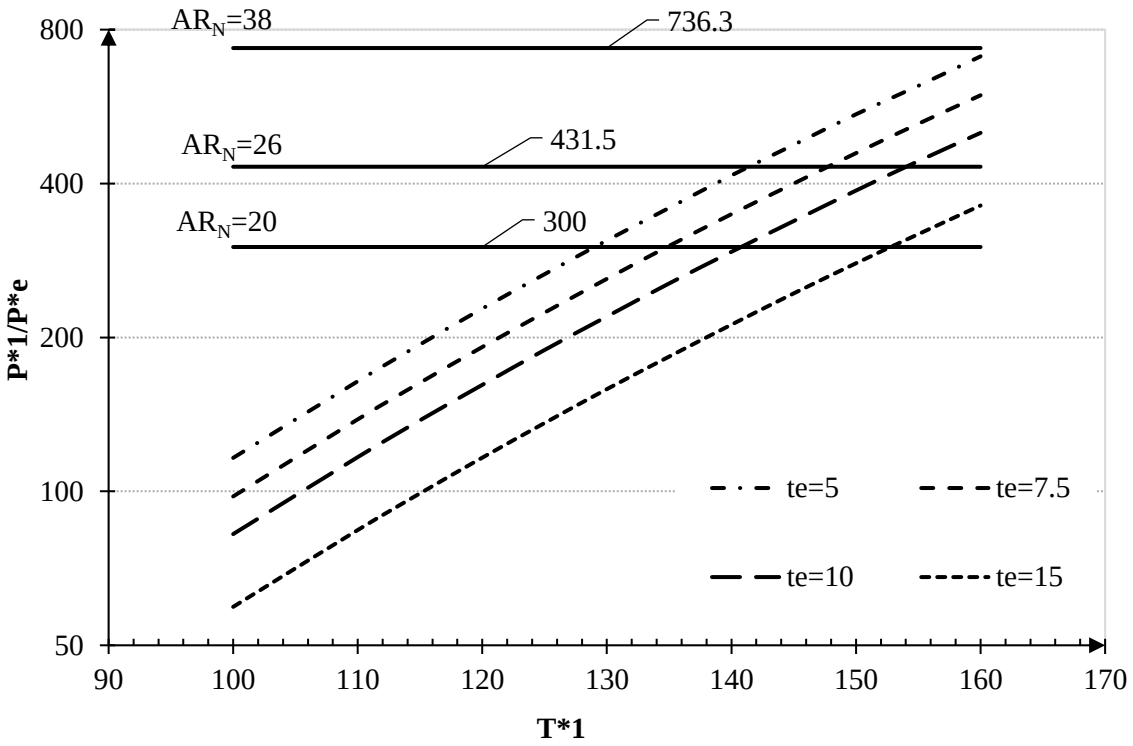
الشكل(3–4): توزع الضغط الستاتيكي على جدار الناشر لنموذجي الغاز المثالي والحقيقي

3–4 مطابقة نتائج النموذج الحاسوبي مع نتائج العلاقات الترموديناميكية النظرية

يحدث الجريان من المبخر إلى حجرة المزج عندما يكون ضغط المبخر أكبر من ضغط التيار الثانوي في مستوي مخرج الفوهة $(P_{2v} < P_e^*)$ ويتبين ذلك من حساب مساحة مدخل التيار الثانوي وفق العلاقة(1.51) بفرض أن الضغط متساوي قطرياً $P_{2v} = P_{2s} = P_2$ ومنه شرط نسبة التمدد حسب العلاقة(1.52):

$$\frac{P_1^*}{P_e^*} < \left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) M_{2s}^2\right]^{\frac{k}{k-1}} \qquad (3.1)$$

من هذه العلاقة يتم ايجاد مجال صحّة استخدام العلاقات النظرية لحساب أقطار القاذف حسب قيمة عدد ماخ المطلوب عند مخرج الفوهة M_{2s} كما يبين الشكل(3–5)، فمثلاً عندما يكون عدد ماخ المطلوب عند مخرج الفوهة $M_{2s} = 4.34$ والموافق للمساحة النسبية للفوهة $AR_N = 20$ يجب أن تكون نسبة التمدد $\frac{P_1^*}{P_e^*} < 300$، في هذه الحالة تكون العلاقات غير صالحة للاستخدام عندما تكون درجة حرارة المرجل $T_1^* \geq 150°C$ من أجل $t_e = 15°C$ وعندما تكون درجة حرارة المرجل $T_1^* \geq 140°C$ من أجل $t_e = 10°C$. يُلاحظ أن مجال صحّة استخدام العلاقات النظرية تزداد مع ازدياد المساحة النسبية للفوهة.



الشكل(3−5): مجال صحّة استخدام العلاقات النظرية لحساب أقطار القاذف

تُحسب أقطار القاذف من العلاقات (1.54) و (1.60) و (1.66) من أجل شروط التشغيل المبينة في الجدول(3−6) مع العلم أن سائل التشغيل هو بخار الماء.

الجدول(3−6): شروط التشغيل المدروسة وخصائص بخار الماء المستخدم

الخاصيّة	القيمة
اللزوجة *[kg/m.s]*	$\mathbf{1.34 \times 10^{-5}}$
الموصلية الحرارية *[W/m.K]*	$\mathbf{0.0261}$
الاستطاعة التبريدية $[W]$	$\dot{Q}_e = \mathbf{1000}$
درجة حرارة المرجل	$T_1^* = \mathbf{130}$ ℃
درجة حرارة المبخر	$T_e^* = \mathbf{7.5}$ ℃
قطر عنق الفوهة $[mm]$	$D_{cr} = \mathbf{1.7}$
اللزوجة التحريكية $[N.s/m^2]$	$\mu = \mathbf{1.34 \times 10^{-5}}$
السعة الحرارية تحت ضغط ثابت $[J/kg.K]$	$C_p = \mathbf{1873}$
ثابت الغاز $[J/kg.K]$	$R = \mathbf{461.5}$
معامل الأديابات	$k = \mathbf{1.327}$
المساحة النسبية للفوهة	$AR_N = \mathbf{20}$
مردود الفوهة	$\eta_N = \mathbf{0.9}$
مردود المزج	$\eta_{mix} = \mathbf{0.9}$
مردود الجزء المتباعد من الناشر	$\eta_D = \mathbf{0.9}$
سرعة خروج المزيج من الناشر $[m/s]$	$u_5 = \mathbf{50}$

يُحسب التدفق الكتلي للتيار الثانوي من العلاقة(1.53):

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_e}{\Delta h_{t_e}} = \frac{1}{2483} = 0.4027 \times 10^{-3}\ [kg/s] = 1.449\ [kg/h] \tag{3.2}$$

يتم حساب عدد ماخ عند مخرج الفوهة من العلاقة(1.35) وضغط حجرة المزج عند مستوي مخرج الفوهة من العلاقة(1.23):

$$P_{2s} = P_{2v} = \frac{P_1^*}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_{2s}^2\right)^{\frac{k}{k-1}}} = \frac{270.085}{\left(1 + \frac{0.327}{2} \times 4.34^2\right)^{\frac{1.327}{0.327}}} = 0.899\ [kPa] \tag{3.3}$$

تُحسب مساحة مدخل التيار الثانوي من العلاقة(1.51):

$$A_{2v} = \frac{\sqrt{\frac{(k-1)RT_e^*}{2k}}}{P_e^{*\frac{k-1}{k}} P_{2v}^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}}} \dot{m}_v = 0.0002941\ [m^2] \tag{3.4}$$

بالتالي يتم حساب قطر مدخل حجرة المزج من العلاقة(1.54) مع العلم أن قطر مخرج الفوهة $D_{2s} = 7.6\ [mm]$:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4A_{2v}}{\pi} + D_{2s}^2} = 0.0208[m] = 20.8\ [mm] \tag{3.5}$$

يُحسب التدفق الكتلي الحرج $\dot{m}_s$ للتيار الأولي من العلاقة(1.27):

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= \sqrt{\frac{k}{R}} . \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} . \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} . A_{cr} \\ &= \sqrt{\frac{1.327}{461.5}} . \left(\frac{2}{2.327}\right)^{\frac{2.327}{0.654}} . \frac{270.085}{\sqrt{403}} \times 2.27 \times 10^{-6} \\ &= 0.954 \times 10^{-3}\ [kg/s] = 3.437\ [kg/h] \end{aligned} \tag{3.6}$$

ومنه نسبة السحب الكتلي:

$$R_m = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_s} = \frac{1.449}{3.437} = 0.422 \tag{3.7}$$

تُحسب بارامترات النقطة (2) كما يلي:

درجة الحرارة الايزوانتروبية عند مخرج الفوهة:

$$T_{2s'} = T_1^* \left(\frac{P_{2s}}{P_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 403 \times \left(\frac{0.899}{270.085}\right)^{\frac{0.327}{1.327}} = 98.8\ [K] \tag{3.8}$$

درجة الحرارة الحقيقية عند مخرج الفوهة من العلاقة(1.20):

$$T_{2s} = T_1^* - \eta_N(T_1^* - T_{2s'}) = 403 - 0.9 \times (403 - 98.8) = 129.2\ [K] \quad (3.9)$$

السرعة الحقيقية للتيار الأولي عند مخرج الفوهة من العلاقة(1.21):

$$u_{2s} = \sqrt{2C_P(T_1^* - T_{2s})} = \sqrt{2 \times 1873 \times (403 - 129.2)} = 1013\ \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.10)$$

تُحسب درجة حرارة التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة من العلاقة(1.40):

$$T_{2v} = T_e^* \left(\frac{P_{2v}}{P_e^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 280.5 \times \left(\frac{0.899}{1.036}\right)^{\frac{0.327}{1.327}} = 271\ [K] \quad (3.11)$$

تُحسب سرعة التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة من العلاقة(1.39):

$$u_{2v} = \sqrt{2C_P(T_e^* - T_{2v})} = \sqrt{2 \times 1873 \times (280.5 - 271)} = 190\ \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.12)$$

ومنه:

$$M_{2v} = \frac{u_{2v}}{\sqrt{kRT_{2v}}} = 0.47 \quad (3.13)$$

باعتبار $P_3 = P_{2s} = P_{2v}$ للتبسيط، تُحسب سرعة المزيج عند بداية عنق الناشر من العلاقة(1.38):

$$u_3 = \eta_{mix} \frac{u_{2s} + R_m u_{2v}}{1 + R_m} = 0.9 \times \frac{1013 + 0.422 \times 190}{1 + 0.422} = 692\ \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.14)$$

يمكن حساب درجة حرارة التوقف للمزيج T_3^* من العلاقة(1.45):

$$T_3^* = \frac{T_{2s} + R_m T_{2v}}{1 + R_m} = \frac{129.2 + 0.422 \times 271}{1 + 0.422} = 367\ [K] \quad (3.15)$$

درجة حرارة المزيج في الحالة (3) من العلاقة(1.43):

$$T_3 = T_3^* - \frac{u_3^2}{2C_p} = 367 - \frac{692^2}{2 \times 1873} = 239\ [K] \quad (3.16)$$

عدد ماخ للمزيج عند الحالة (3):

$$M_3 = \frac{u_3}{\sqrt{kRT_3}} = 1.81 \quad (3.17)$$

ومنه تُحسب مساحة مقطع عنق الناشر من العلاقة(1.60):

$$A_T = \frac{\dot{m}_s + \dot{m}_v}{\frac{P_3}{R.T_3} u_3} = 0.000240627\ [m^2] \quad (3.18)$$

بالتالي قطر عنق الناشر:

$$D_T = \sqrt{\frac{4A_T}{\pi}} = 0.0175\ [m] = 17.5\ [mm] \quad (3.19)$$

تُحسب بارامترات الحالة (4) من العلاقات (1.55) و (1.56) و (1.57) و (1.59) بدلالة M_3 على التتالي كما يلي:

$$u_4 = u_3\left[\frac{(k-1)M_3^2+2}{(k+1)M_3^2}\right] = 279\ \left[\frac{m}{s}\right] \tag{3.20}$$

$$P_4 = P_3\left[\frac{2k}{(k+1)}.M_3^2 - \frac{k-1}{k+1}\right] = 3.23\ [kPa] \tag{3.21}$$

$$T_4 = T_3\left[\frac{P_4}{P_3}.\frac{u_4}{u_3}\right] = 346\ [K] \tag{3.22}$$

$$M_4 = \sqrt{\frac{1+\frac{k-1}{2}.M_3^2}{k.M_3^2 - \frac{k-1}{2}}} = 0.61 \tag{3.23}$$

تُحسب بارامترات الحالة (5) من العلاقات (1.63) و (1.62) و (1.64) و (1.65) على التتالي:

$$T_5 = T_5^* - \frac{u_5^2}{2C_p} = 367 - \frac{50^2}{2\times 1873} = 366\ [K] \tag{3.24}$$

$$T_{5'} = \eta_D(T_5 - T_4) + T_4 = 364\ [K] \tag{3.25}$$

$$P_5^* = P_4.\left(\frac{T_{5'}}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 3.97\ [kPa] \tag{3.26}$$

$$P_5 = P_5^*\left(\frac{T_5}{T_5^*}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 3.94\ [kPa] \tag{3.27}$$

تُحسب مساحة مقطع مخرج الناشر من العلاقة(1.66):

$$A_5 = \frac{\dot{m}_s + \dot{m}_v}{\frac{P_5}{R.T_5}.u_5} = 0.001148591\ [m^2] \tag{3.28}$$

بالتالي قطر مخرج الناشر:

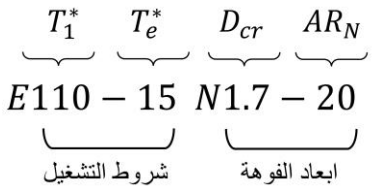
$$D_5 = \sqrt{\frac{4A_5}{\pi}} = 0.0382\ [m] = 38.2\ [mm] \tag{3.29}$$

تعيّن أطوال حجرة المزج L_C وعنق الناشر L_T والجزء المتباعد للناشر L_D في الشكل(1−11) من العلاقات التالية: (*ESDU, 1986*)

$$L_T = (3\sim5)\times D_T \quad \text{طول عنق الناشر:}$$
$$L_C = (6\sim8)\times D_T \quad \text{طول حجرة المزج:} \tag{3.30}$$
$$L_d = (4\sim12)\times D_T \quad \text{طول الجزء المتباعد من الناشر:}$$

يمكن ايجاد أبعاد القاذف بالطريقة ذاتها من أجل شروط تشغيل مختلفة. يبين الجدول(3−7) أقطار القاذف المحسوبة وفق العلاقات الرياضية السابقة من أجل شروط تشغيل وأبعاد فوهات مختلفة، نلاحظ من الجدول أن القيم المظللة مرفوضة لأن قطر عنق القاذف أكبر من قطر مدخل حجرة المزج $(D_T > D_2)$. بعض حقول

الجدول غير محسوبة لأن العلاقة(3.1) غير محققة. يبين الشكل(3–6) طريقة ترميز القاذف وفق الأبعاد وشروط التشغيل حيث تشير الأعداد بعد الحرف E إلى شروط التشغيل والاعداد بعد الحرف N إلى أبعاد الفوهة.



الشكل(3–6): ترميز القاذف

الجدول(3–7): أقطار القاذف وفق العلاقات النظرية

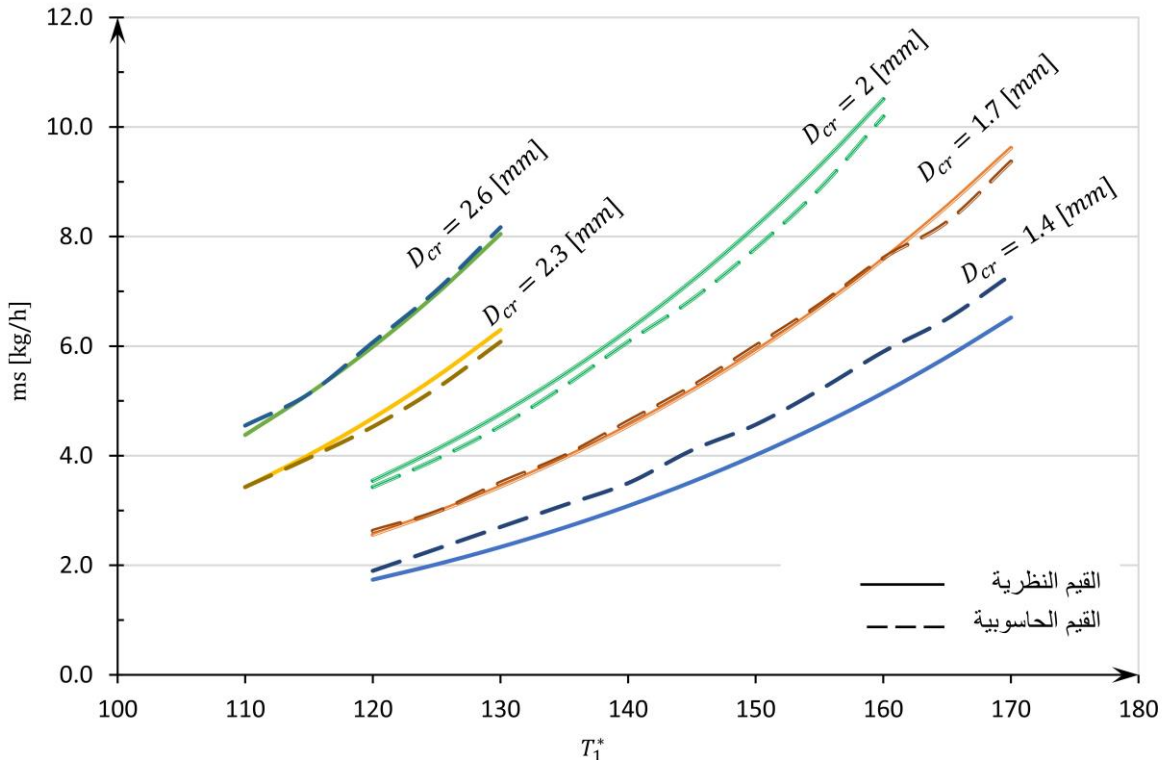
	T_e^*		**5**℃	**7.5**℃	**10**℃	**15**℃
	$T_1^* = 110$℃	D_2 [mm]	18.6	17.4	16.5	15.1
		D_T [mm]	18.8	18.2	17.6	16.8
		D_5 [mm]	41.3	39.5	38.0	35.7
	$T_1^* = 130$℃	D_2 [mm]	-	20.2	16.7	14.1
N1.3-20		D_T [mm]	-	16.3	15.6	14.7
		D_5 [mm]	-	36.6	34.4	31.8
	$T_1^* = 150$℃	D_2 [mm]	-	-	-	18.4
		D_T [mm]	-	-	-	13.6
		D_5 [mm]	-	-	-	30.3
	$T_1^* = 110$℃	D_2 [mm]	19.2	18.1	17.2	15.9
		D_T [mm]	19.8	19.3	18.9	18.2
		D_5 [mm]	42.7	41.2	40.0	38.1
	$T_1^* = 130$℃	D_2 [mm]	-	20.8	17.5	14.9
N1.7-20		D_T [mm]	-	17.5	16.9	16.2
		D_5 [mm]	-	38.2	36.6	34.6
	$T_1^* = 150$℃	D_2 [mm]	-	-	-	19.1
		D_T [mm]	-	-	-	15.2
		D_5 [mm]	-	-	-	33.1
	$T_1^* = 140$℃	D_2 [mm]	-	-	29.6	17.3
N2.5-20		D_T [mm]	-	-	20.4	19.6
		D_5 [mm]	-	-	43.4	41.3
	$T_1^* = 160$℃	D_2 [mm]	29.7	19.8	17.3	15.1
N1.3-38		D_T [mm]	19.1	18.3	17.9	17.3
		D_5 [mm]	41.8	39.5	38.3	36.6
	$T_1^* = 160$℃	D_2 [mm]	29.5	20.8	18.6	16.6
N1.7-38		D_T [mm]	21.7	21.1	20.7	20.2
		D_5 [mm]	46.4	44.8	43.8	42.5

من أجل التأكد من أن العلاقات الرياضية النظرية المستخدمة في حساب أبعاد القاذف موافقة للعلاقات التي يستخدمها برنامج *ANSYS Fluent* نتحقق من توافق قيم التدفق الكتلي للتيار الأولي والثانوي ونسبة السحب لكلا الطريقتين. يبين الجدول(3−8) مقارنة القيم الناتجة من العلاقات النظرية مع نتائج المحاكاة الحاسوبية مع ملاحظة أنه لا يمكن تحديد ضغط التكاثف الحرج نظرياً لكن يتم تحديده من خلال النمذجة الحاسوبية. يتبين من الجدول أنّ الخطأ النسبي لكل من التدفق الكتلي للتيار الأولي والتيار الثانوي ونسبة السحب الكتلي لا تتجاوز *5%*.

الجدول(3−8): القيم النظرية ونتائج المحاكاة الحاسوبية للقواذف المصممة نظرياً

رمز القاذف	$m_s\ [kg/h]$		$m_v\ [kg/h]$		R_m		$P_{c,cr}$ $[kPa]$	error		
	نظرياً	حاسوبياً	نظرياً	حاسوبياً	نظرياً	حاسوبياً	حاسوبياً	Δm_s	Δm_v	ΔR_m
D_{cr}=1.3[mm]										
E130-7.5N1.3-20	2.01	1.98	1.449	1.47	0.721	0.7424	2.8	-1.5%	1.45%	2.97%
E130-10N1.3-20	2.01	1.98	1.453	1.48	0.723	0.7475	2.8	-1.5%	1.86%	3.39%
E150-15N1.3-20	3.45	3.35	1.459	1.475	0.422	0.4403	5.2	-2.9%	1.10%	4.34%
E160-5N1.3-38	4.44	4.32	1.446	1.47	0.326	0.3403	4.31	-2.7%	1.66%	4.38%
E160-7.5N1.3-38	4.44	4.32	1.449	1.47	0.326	0.3403	4.83	-2.6%	1.45%	4.38%
D_{cr}=1.7 [mm]										
E110-10N1.7-20	1.87	1.85	1.453	1.465	0.777	0.7919	2.5	-1.12%	0.83%	1.92%
E110-15N1.7-20	1.87	1.85	1.460	1.479	0.780	0.7995	2.5	-1.12%	1.30%	2.49%
E130-7.5N1.7-20	3.44	3.4038	1.450	1.472	0.422	0.4326	2.8	-1.00%	1.54%	2.51%
E130-10N1.7-20	3.44	3.4038	1.453	1.477	0.423	0.4339	2.8	-1.00%	1.65%	2.58%
E150-15N1.7-20	5.91	5.84	1.460	1.47	0.247	0.2517	5.2	-1.22%	0.68%	1.91%
E160-5N1.7-38	7.59	7.48	1.446	1.453	0.191	0.1943	6.75	-1.40%	0.48%	1.70%
D_{cr}=2.5 [mm]										
E140-10N2.5-20	9.82	9.7	1.453	1.49	0.148	0.1536	7.8	-1.25%	2.55%	3.79%

يبين الشكل(3−7) قيم التدفق الكتلي الحرج للتيار الأولي كتابع لدرجة حرارة المرجل من أجل أقطار عنق فوهات مختلفة حيث يبين المنحني المستمر القيم المحسوبة نظرياً وفق العلاقة(1.27) ويُمثّل المنحني المنقط القيم المستخرجة من المحاكاة الحاسوبية.



الشكل(3-7): مقارنة النتائج الحاسوبية مع النتائج النظرية للتدفق الكتلي للتيار الأولي

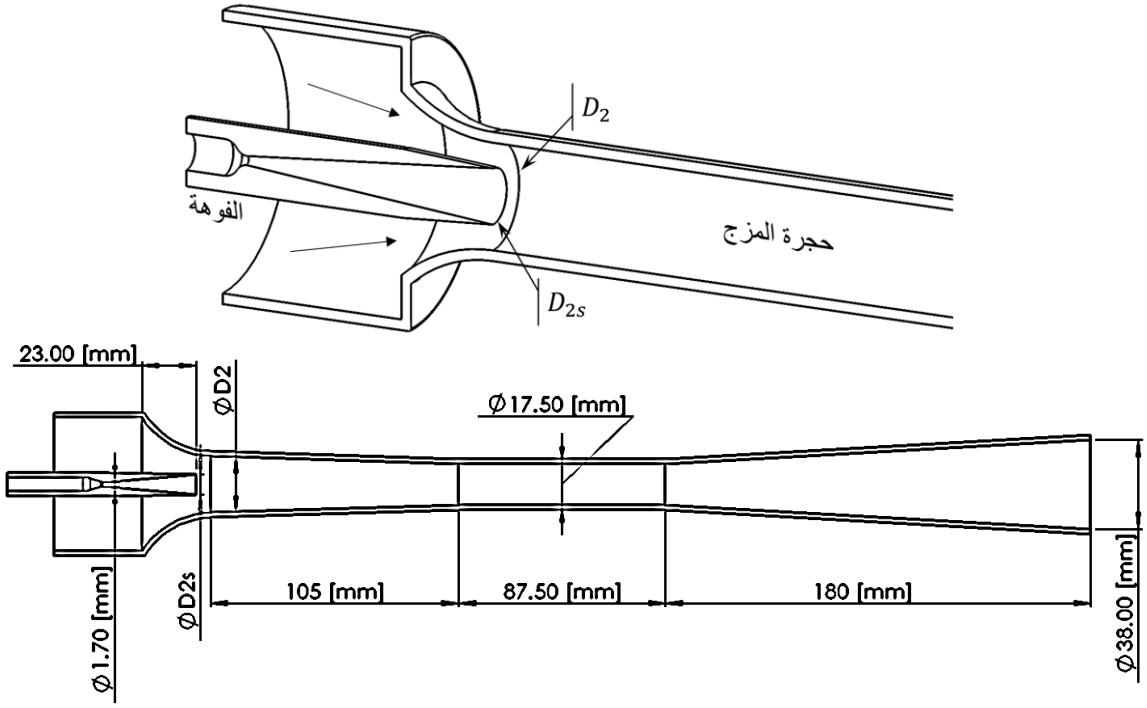
مما سبق يمكن استنتاج صحة استخدام العلاقات الرياضية النظرية الناظمة لحقل الجريان ضمن القاذف البخاري باعتبار الجريان ايزوانتروبي وذلك بنسبة خطأ مقبولة جداً لنسبة السحب الكتلي. كما يمكن استنتاج أن العلاقات الرياضية المستخدمة موافقة للعلاقات التي يعتمدها برنامج *ANSYS Fluent*.

الفصل الرابع

تأثير تغيّر البارامترات الهندسية التصميمية على أداء القاذف البخاري

The effect of geometric design parameters on steam ejector performance

أكّدت الدراسات المرجعية أنّ أداء القاذف البخاري يتأثر بشدة بالبارامترات التشغيلية وبالشكل الهندسي للفوهة وللناشر على حدٍّ سواء. يبيّن هذا الفصل في جزئه الأول تأثير موجات التمدد عند مخرج الفوهة على الأداء وذلك بتغيير الشكل الهندسي لكل من الفوهة وحجرة المزج. كما يبين في الجزء الثاني تأثير تغيير مساحة مقطع دخول التيار الثانوي إلى حجرة المزج على أداء القاذف. إن مدخل التيار الثانوي ذي شكل حلقي محصور بين جسم الناشر وجسم الفوهة عند مستوي مخرج الفوهة. يبين الشكل(4−1) أبعاد القاذف المدروس *E130-7.5N1.7-20* والذي قد تم حساب أبعاده بناءً على العلاقات النظرية حيث درجة حرارة المرجل 130 °C ودرجة حرارة المبخر 7.5 °C.



الشكل(4−1): أبعاد القاذف لدراسة تأثير البارامترات الهندسية التصميمية على الأداء

4−1 تأثير مساحة مخرج الفوهة على أداء القاذف البخاري مع ثبات مساحة مدخل التيار الثانوي

يشكّل امتزاج التيارين الأولي والثانوي جرياناً معقداً في حجرة المزج، يؤثر هذا التداخل بين التيارين وما ينتج عنه من موجات تمدد وموجات صدمة على أداء القاذف وبالتالي على أداء دارة التبريد القاذفة للبخار. يتعلق حدوث موجات التمدد خلف الفوهة بقيمة الضغط الخلفي أي بضغط حجرة المزج وبعدد ماخ عند مخرجها. لدراسة تأثير موجات التمدد على الأداء يتم تغيير مساحة مخرج الفوهة A_{2s} للحصول على أعداد ماخ مختلفة وذلك بتغيير قيم قطر مخرج الفوهة D_{2s} و قطر مدخل الناشر D_2، مع الحفاظ على مساحة مدخل التيار الثانوي A_{2v} ثابتة.

يبين الجدول(4−1) أبعاد القواذف المدروسة لتأثير موجات التمدد حيث يشير العدد بعد الحرف E إلى المساحة النسبية لحجرة المزج (A_{2v}/A_{2s}). ويرمز العدد بعد الحرف M إلى قيمة عدد ماخ عند مخرج الفوهة المحسوبة نظرياً من العلاقة(1.35). الجدير بالذكر أنّ أقطار القاذف *E6.5M4.34* هي القيم التصميمية المستنتجة

من العلاقات الرياضية النظرية للجريان الايزوانتروبي بينما تم تعديل الأقطار في الحالات الأخرى للحصول على موجات تمدد مختلفة مع الحفاظ على مساحة مدخل التيار الثانوي ثابتة $A_{2v} = 294.2\ [mm^2]$.

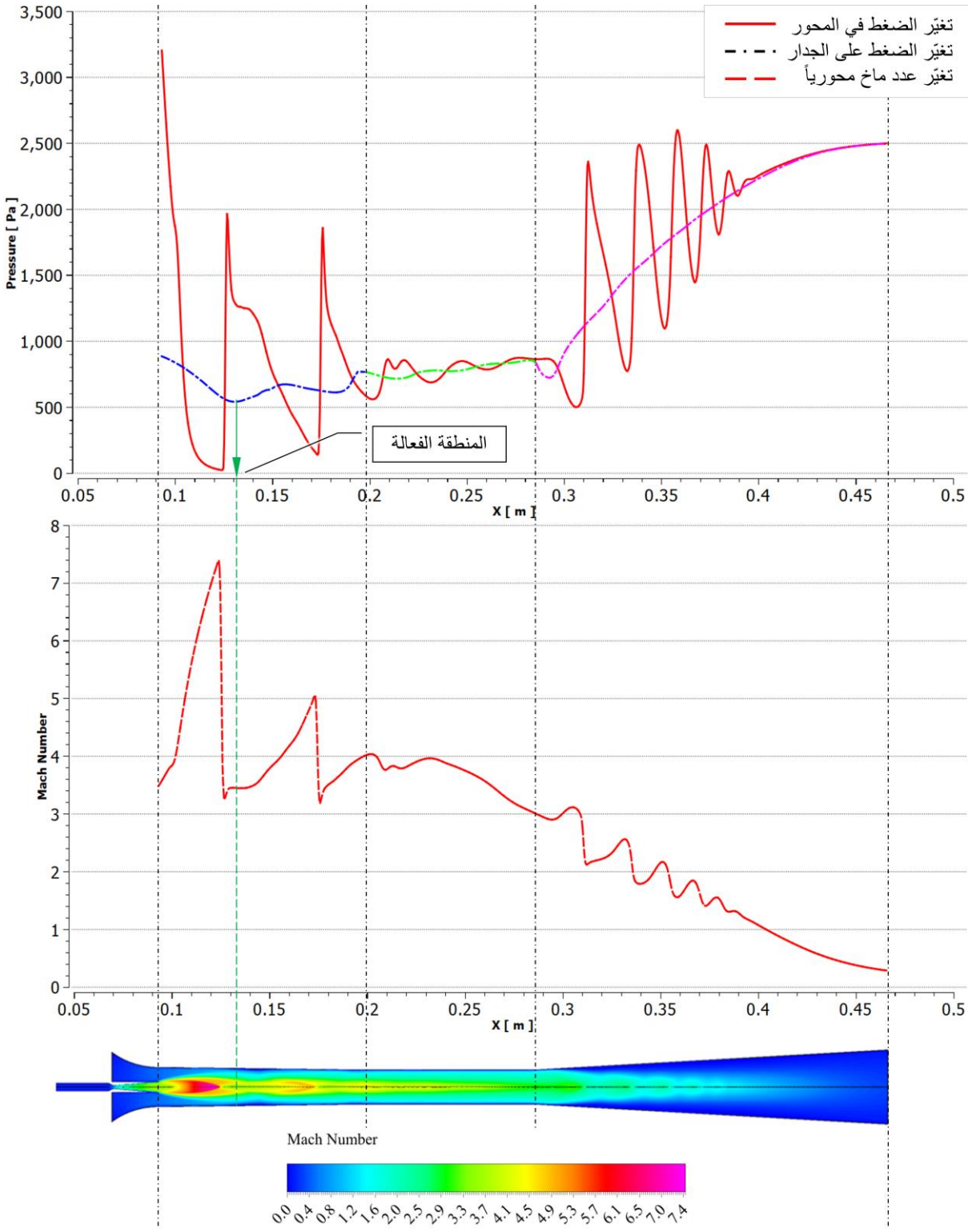
الجدول(4−1): أبعاد حجرة المزج في التصاميم المدروسة للقواذف لدراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات مساحة مدخل التيار الثانوي

ترميز القاذف	*E12M3.7*	*E6.5M4.34*	*E3.4M5*	*E2.4M5.4*	*E1.9M5.6*	*E1.7M5.8*	*E1.4M6*
A_{2v}/A_{2s}	12.56	6.48	3.4	2.4	1.91	1.66	1.39
$D_2\ [mm]$	20.11	20.8	22.02	23.04	23.887	24.487	25.38
$D_{2s}\ [mm]$	5.46	7.6	10.49	12.5	14	15	16.41

4−1−1 تحليل حقل الجريان في القاذف *E12M3.7*

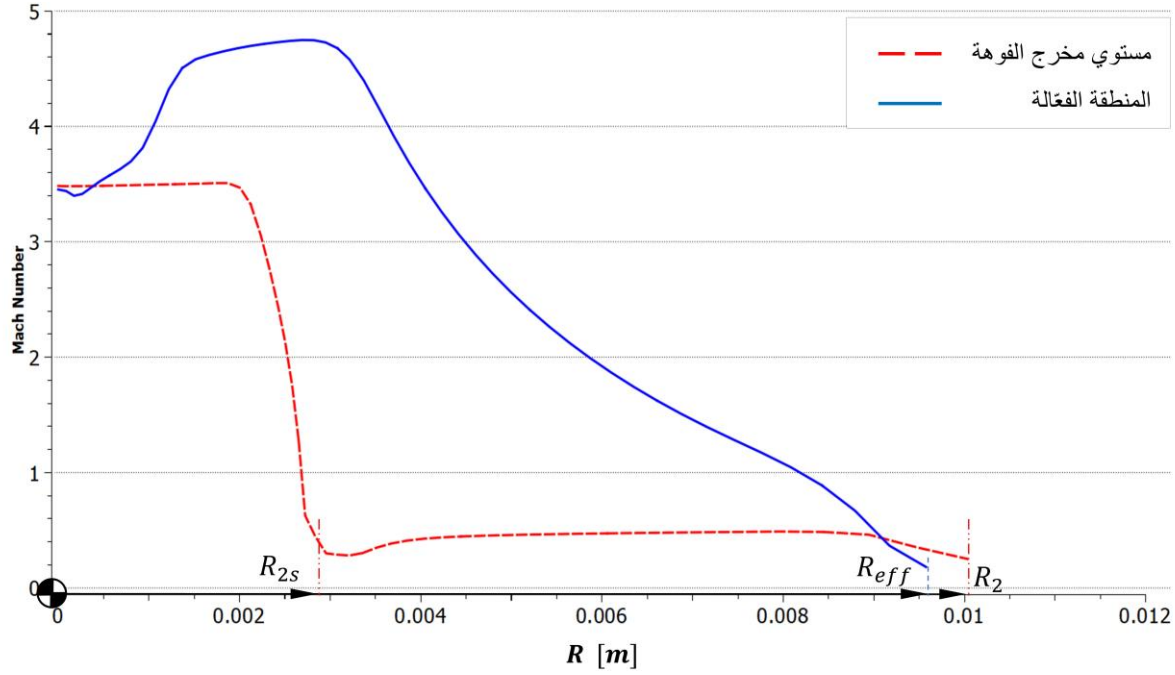
يُلاحظ من تغيّر الضغط على طول القاذف *E12M3.7* في الشكل(4−2) أن الضغط الخلفي في حجرة المزج أقل من الضغط عند مخرج الفوهة بالتالي فإنّ موجات التمدد خلف الفوهة ذات تمدد ضعيف وبالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متباعداً عن محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل. يدل تذبذب الضغط على طول المحور على حدوث موجات صدمة مائلة متداخلة. تحدث سلسلتين من موجات الصدمة: الأولى في حجرة المزج والثانية في بداية الجزء المتباعد من الناشر حيث تنقل الجريان من فوق صوتي إلى جريان تحت صوتي. يبلغ عدد ماخ قيمة عظمى تساوي 7.4 في المحور في حجرة المزج ثم ينخفض تدريجياً. تقع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة عند الاحداثي $x_{eff.} = 131\ [mm]$.

يبلغ التدفق الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s = 3.389\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.33\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.393$.



الشكل(4−2): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E12M3.7*

يبين الشكل(4−3) أنّ التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة تحت صوتي $(M_{2v} < 1)$. يبلغ التيار الثانوي سرعة الصوت في المنطقة الفعّالة.

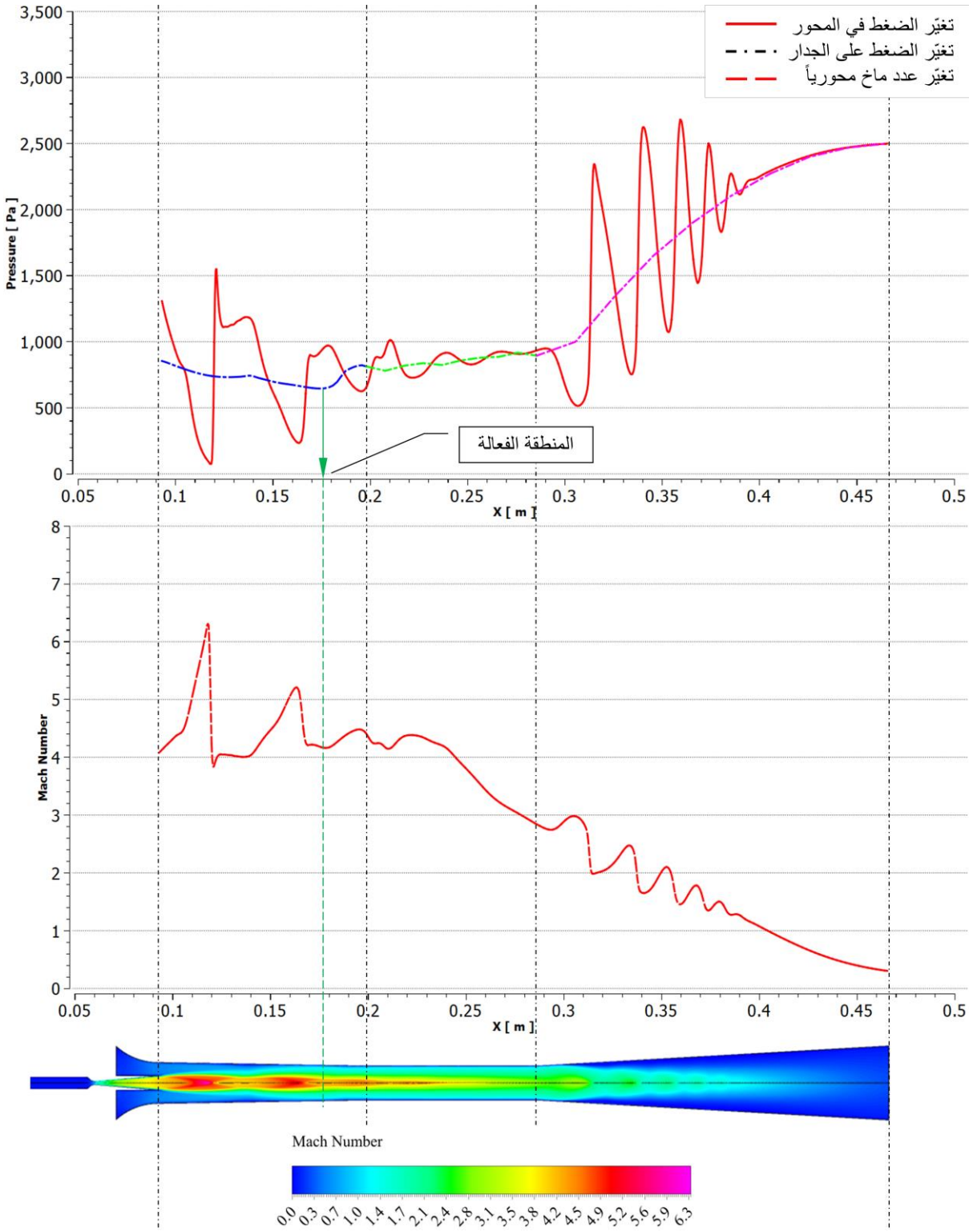


الشكل(4−3): تغيّر عدد ماخ قطرياً في القاذف *E12M3.7*

4−1−2 تحليل حقل الجريان في القاذف *E6.5M4.34*

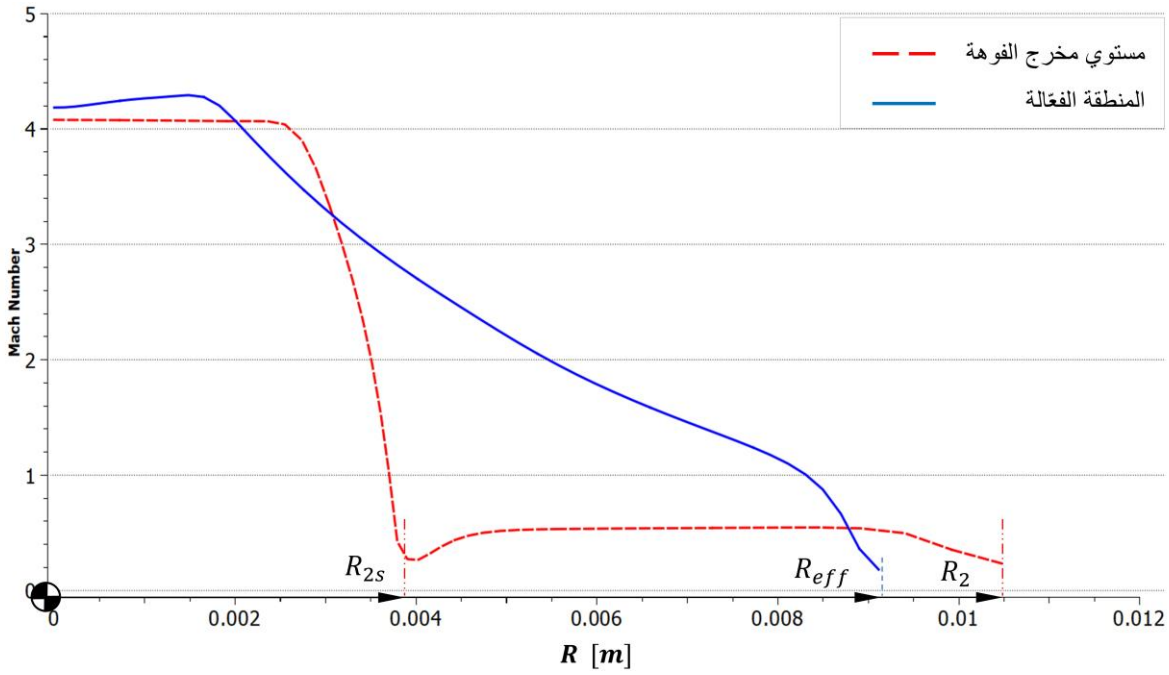
إنّ الضغط الخلفي في القاذف *E6.5M4.34* كما يبين الشكل(4−4) أخفض من الضغط عند مخرج الفوهة بالتالي فإن موجات التمدد خلف الفوهة ذات تمدد ضعيف ونواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متباعداً عن محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل. يُلاحظ من توزع الضغط محورياً في السلسلة الأولى من موجات الصدمة المائلة أنّ تذبذب الضغط أقل من الحالة السابقة وخاصّةً في حجرة المزج. يبلغ عدد ماخ محورياً قيمة عظمى تساوي 6.2 في منطقة ما من حجرة المزج وينخفض بشكل حاد في عنق الناشر إلى أن يصبح الجريان تحت صوتي في بداية الجزء المتباعد للناشر نتيجة حدوث موجة صدمة كما في الحالة السابقة. تقع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة عند الاحداثي $x_{eff.} = 175\ [mm]$.

تبين النتائج العددية المستخرجة من برنامج *Fluent* أن التدفق الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s =$ $3.397\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.455\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.428$.



الشكل(4–4): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E6.5M4.34*

يبين الشكل(4–5) أنّ التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة تحت صوتي $(M_{2v} < 1)$. يبلغ التيار الثانوي سرعة الصوت في المنطقة الفعّالة.

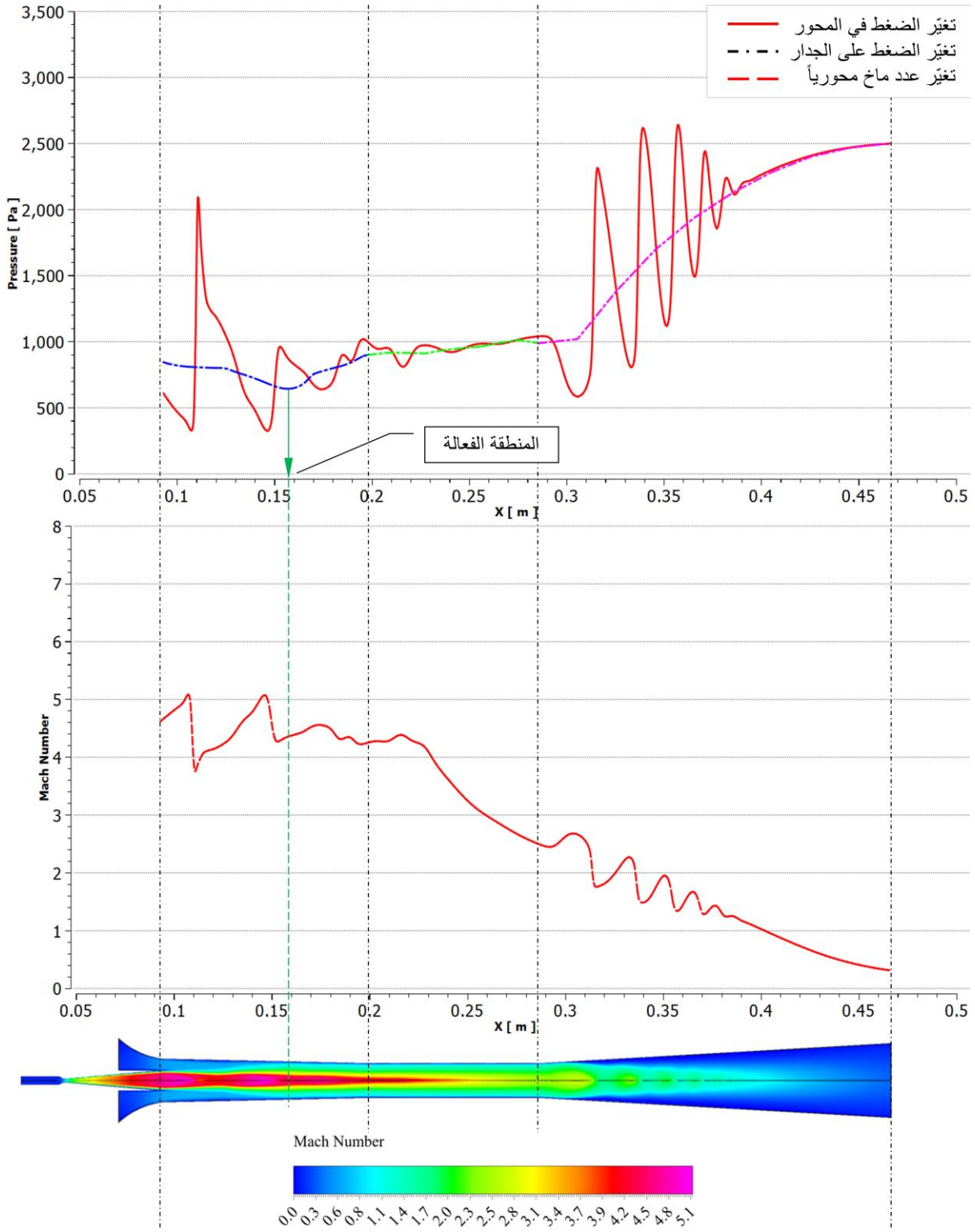


الشكل(4−5): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E6.5M4.34*

4−1−3 تحليل حقل الجريان في القاذف *E3.4M5*

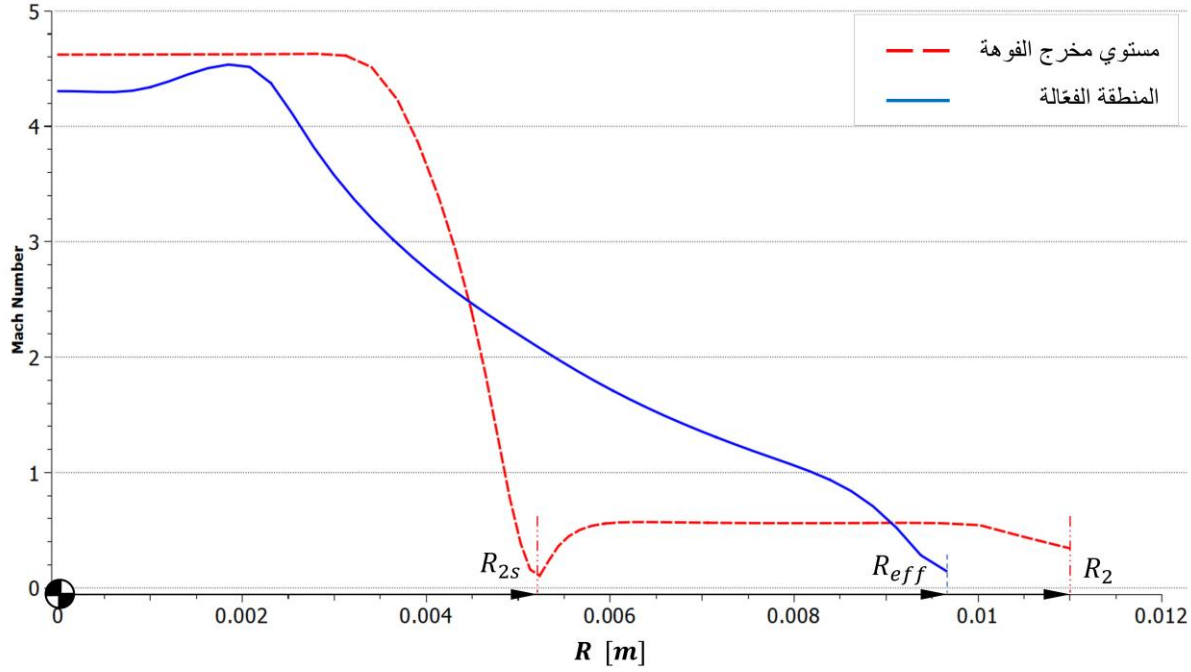
إنّ الفوهة في القاذف *E3.4M5* ذات تمدد شديد لأن الضغط الخلفي أكبر من ضغط مخرج الفوهة حسب تغيّر الضغط محورياً كما يبين الشكل(4−6) ونواة التيار الأولي متقاربة نحو المحور وبالتالي فإن مجرى السحب للتيار الثانوي أكبر مما يؤدي إلى زيادة القيمة العظمى للتدفق الكتلي للتيار الثانوي. كما يُلاحظ أن عدد ماخ الاعظمي 5.1 في حجرة المزج. ينتقل الجريان إلى جريان تحت صوتي عند بداية الجزء المتباعد في الناشر كما في الحالتين السابقتين. إنّ المنطقة الفعّالة في هذه الحالة تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 158\ [mm]$.

تبين النتائج العددية المستخرجة من برنامج *Fluent* أنّ الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s = 3.393\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.521\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.448$.



الشكل(4–6): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E3.4M5*

يبين الشكل(4–7) أنّ التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة تحت صوتي $(M_{2v} < 1)$. يبلغ التيار الثانوي سرعة الصوت في المنطقة الفعّالة.

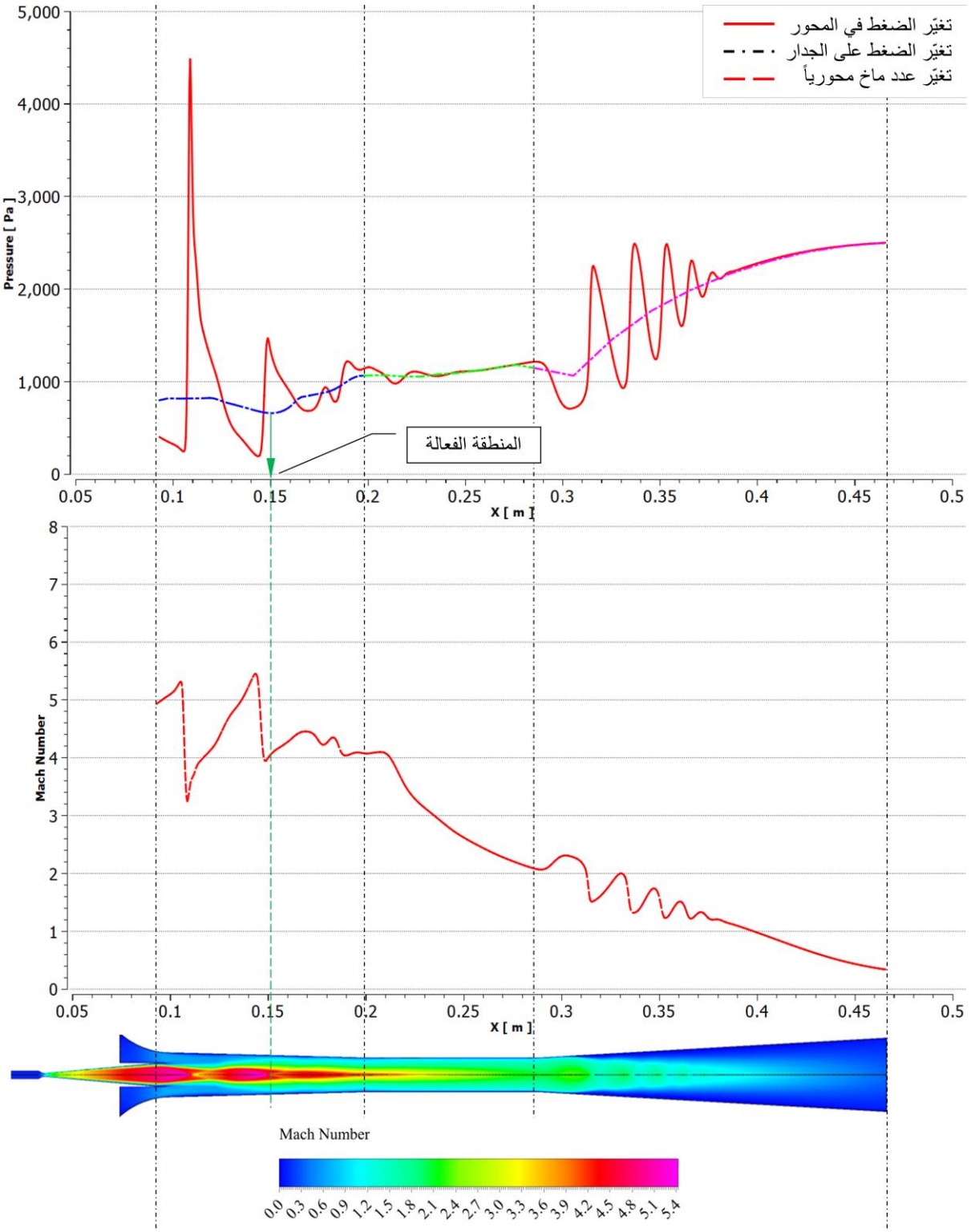


الشكل(4−7): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E3.4M5*

4−1−4 تحليل حقل الجريان في القاذف *E2.4M5.4*

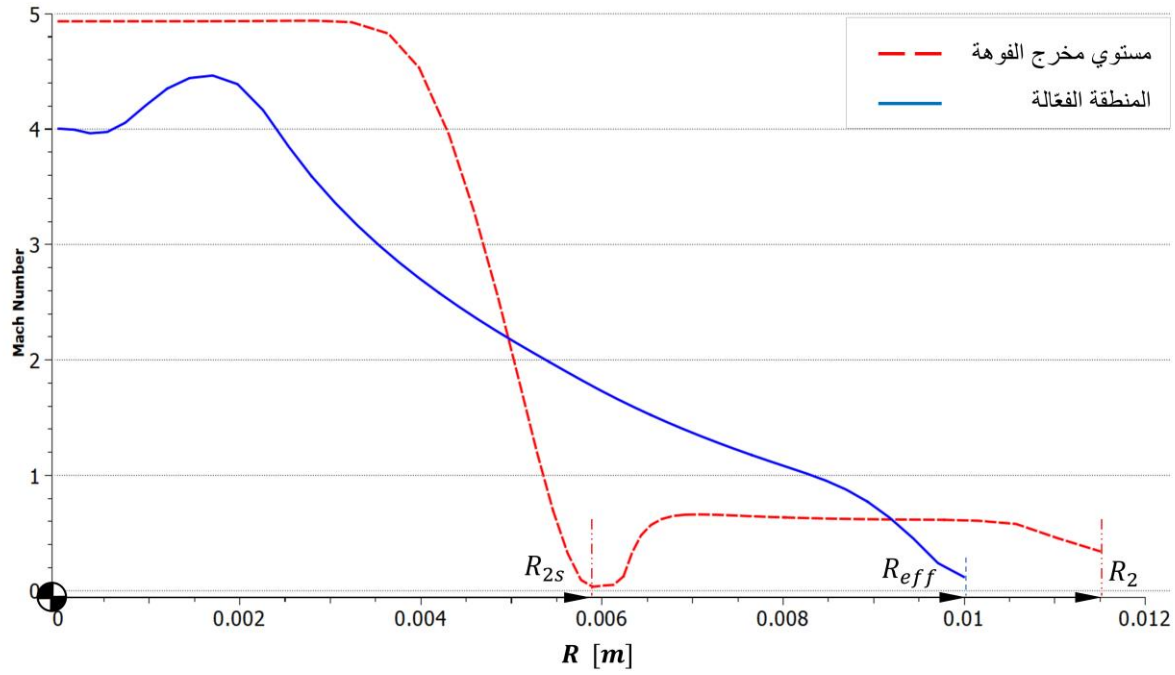
إنّ موجات التمدد خلف الفوهة في القاذف *E2.4M5.4* ذات تمدد شديد أيضاً لأن الضغط الخلفي أكبر من ضغط مخرج الفوهة حسب تغيّر الضغط محورياً كما يبين الشكل(4−8) ، بالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متقارباً عن محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل، يؤدي ذلك إلى ازدياد مجرى السحب للتيار الثانوي مما يؤدي إلى زيادة القيمة العظمى للتدفق الكتلي للتيار الثانوي. يبلغ عدد ماخ قيمة عظمى تساوي 5.2 في حجرة المزج ثم ينخفض تدريجياً ليصبح أقل من 1 في نهاية الناشر. إنّ المنطقة الفعّالة في هذه الحالة تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 150\ [mm]$.

تبين النتائج العددية المستخرجة من برنامج *Fluent* أنّ الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s =$ $3.395\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.603\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.472$.



الشكل(4–8): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E2.4M5.4*

يبين الشكل(4–9) أنّ التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة تحت صوتي $(M_{2v} < 1)$. يبلغ التيار الثانوي سرعة الصوت في المنطقة الفعّالة.

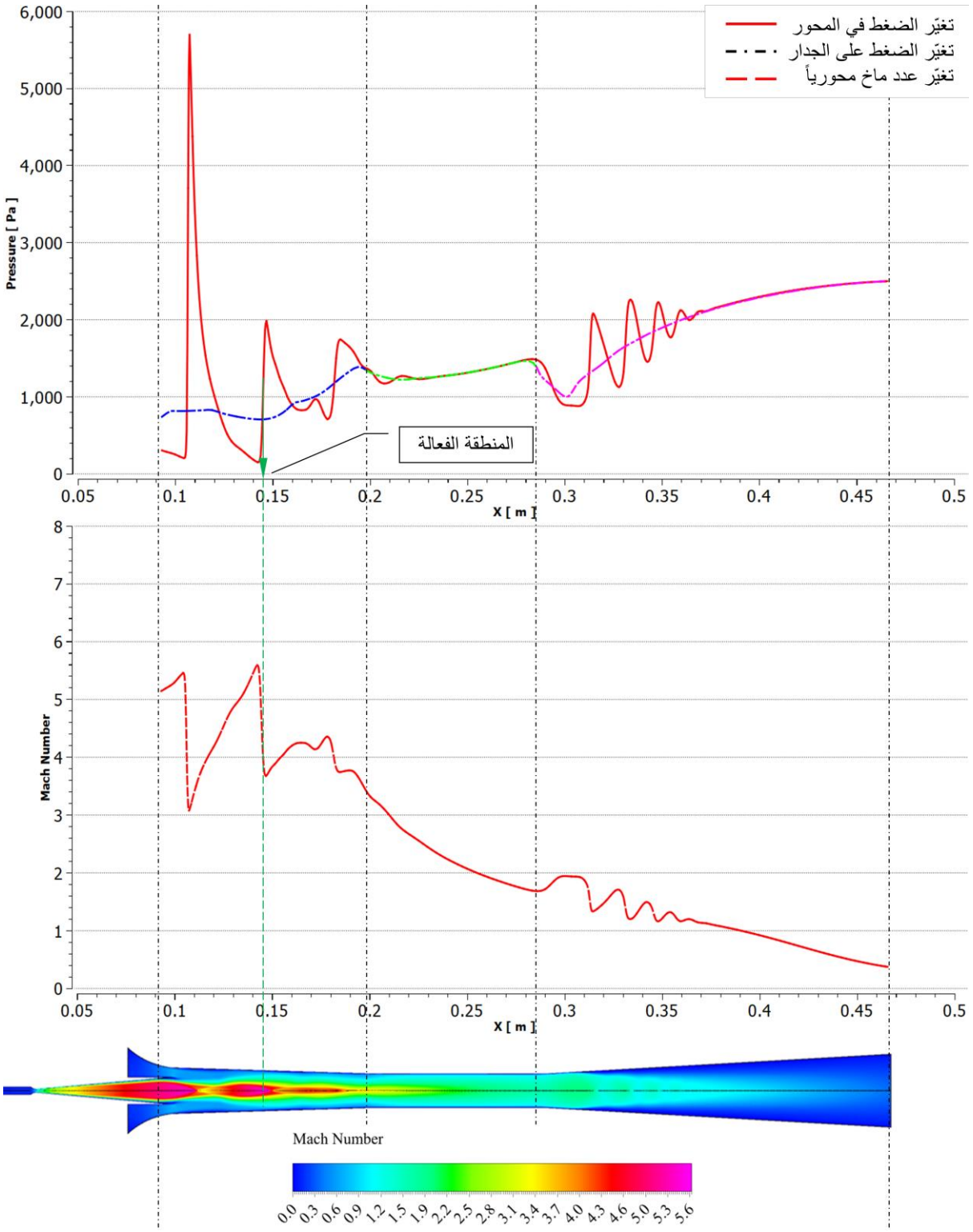


الشكل(4−9): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E2.4M5.4*

4−1−5 تحليل حقل الجريان في القاذف *E1.9M5.6*

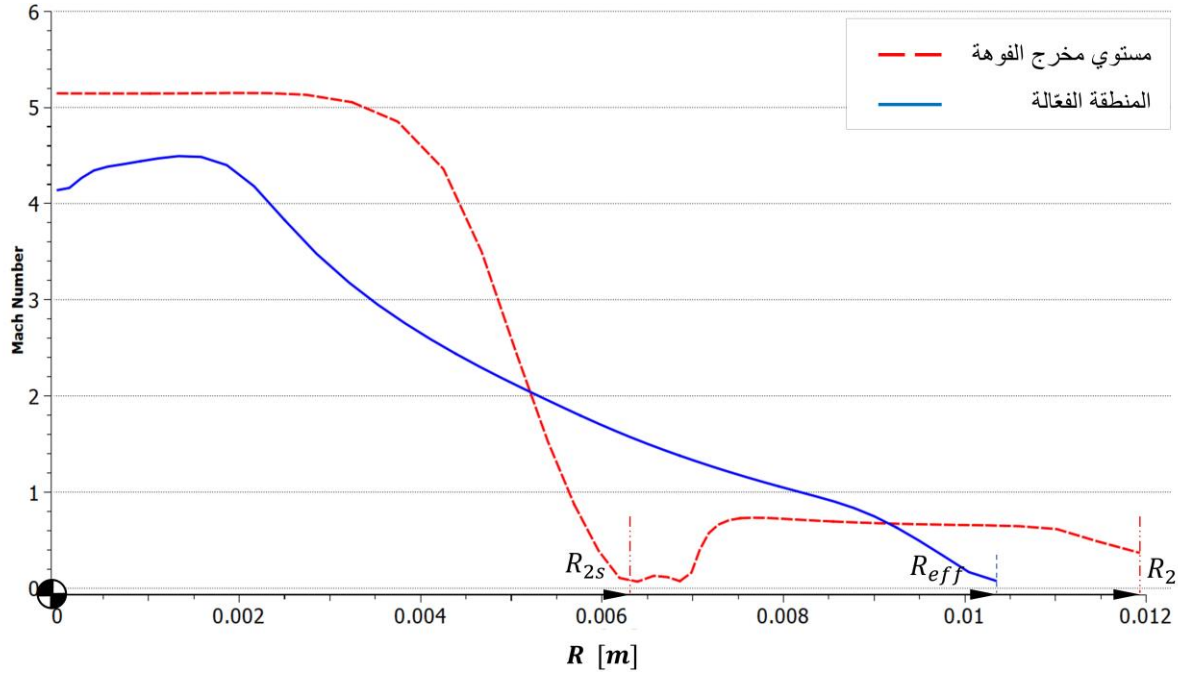
إنّ موجات التمدد خلف الفوهة في القاذف *E1.9M5.6* ذات تمدد شديد لأن الضغط الخلفي أكبر من ضغط مخرج الفوهة حسب تغيّر الضغط محورياً كما يبين الشكل(4−10) ، بالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متقارباً عن محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل، يؤدي ذلك إلى ازدياد مجرى السحب للتيار الثانوي مما يؤدي إلى زيادة القيمة العظمى للتدفق الكتلي للتيار الثانوي. يبلغ عدد ماخ قيمة عظمى تساوي 5.5 في حجرة المزج ثم ينخفض تدريجياً ليصبح أقل من 1 في نهاية الناشر. إنّ المنطقة الفعّالة في هذه الحالة تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 145\ [mm]$.

تبين النتائج العددية المستخرجة من برنامج *Fluent* أنّ الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s =$ $3.394\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.666\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.491$.



الشكل(4−10): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E1.9M5.6*

يبين الشكل(4−11) أنّ التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة تحت صوتي $(M_{2v} < 1)$. يبلغ التيار الثانوي سرعة الصوت في المنطقة الفعّالة.

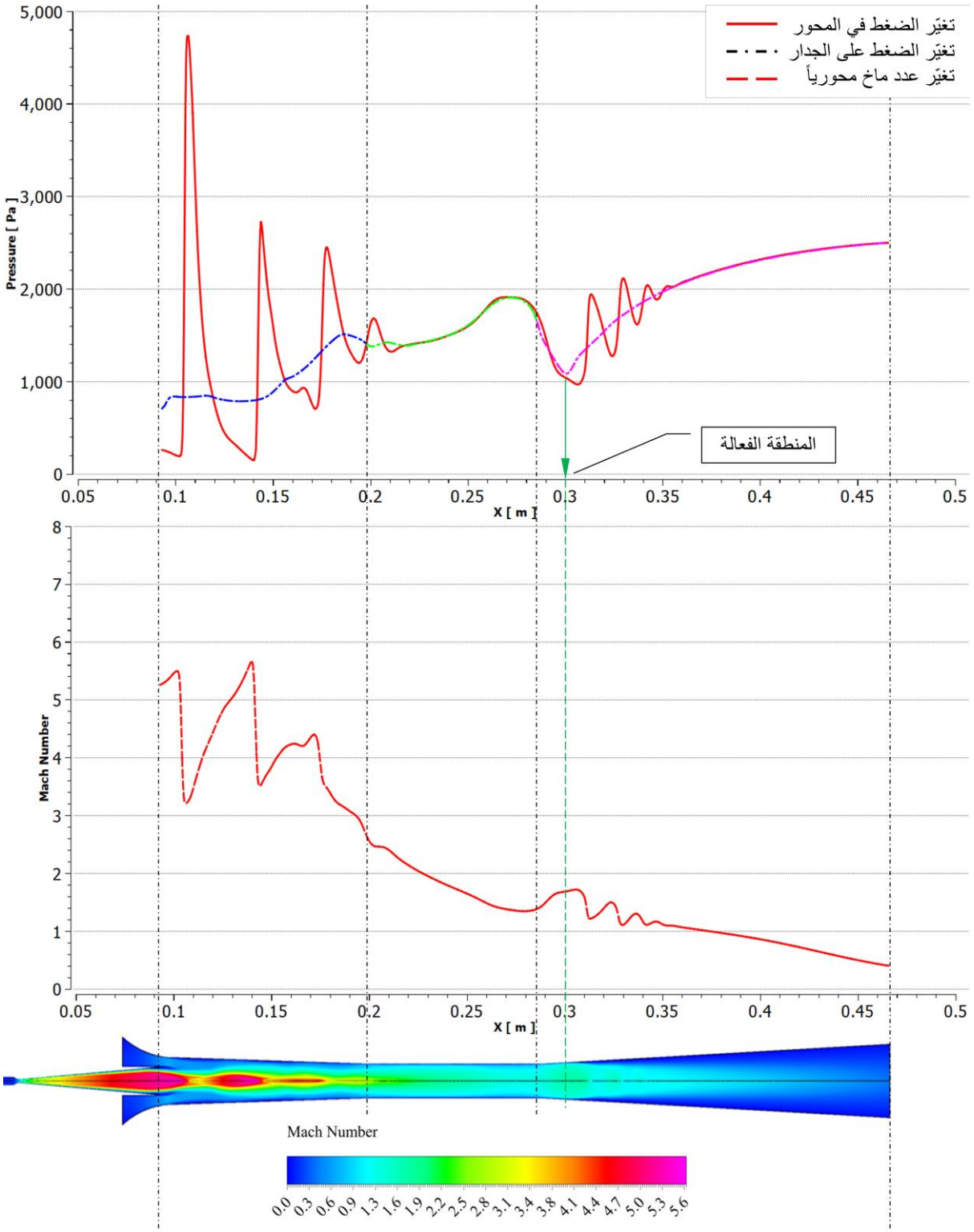


الشكل(4−11): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E1.9M5.6*

4−1−6 تحليل حقل الجريان في القاذف *E1.7M5.8*

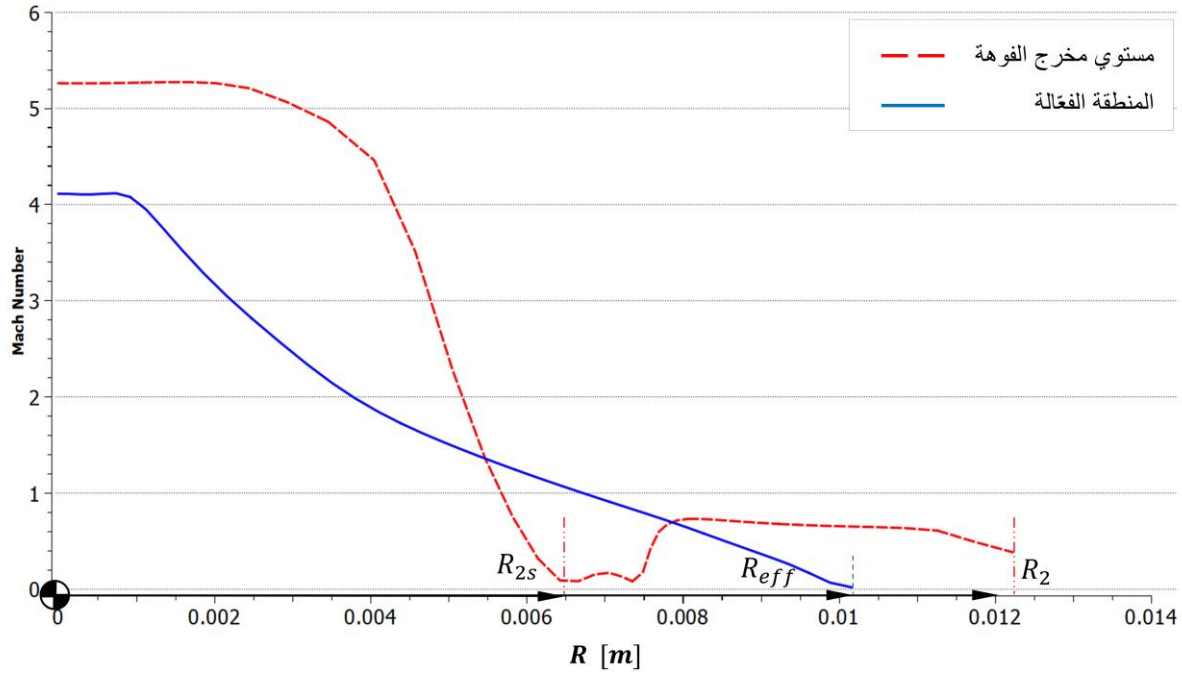
إنّ موجات التمدد خلف الفوهة في القاذف *E1.7M5.8* ذات تمدد شديد لأن الضغط الخلفي أكبر من ضغط مخرج الفوهة حسب تغيّر الضغط محورياً كما يبين الشكل(4−12) ، بالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متقارباً عن محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل، يؤدي ذلك إلى ازدياد مجرى السحب للتيار الثانوي مما يؤدي إلى زيادة القيمة العظمى للتدفق الكتلي للتيار الثانوي. يبلغ عدد ماخ قيمة عظمى تساوي 5.6 في حجرة المزج ثم ينخفض تدريجياً ليصبح أقل من 1 في نهاية الناشر. إنّ المنطقة الفعّالة في هذه الحالة تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 300\ [mm]$.

تبين النتائج العددية المستخرجة من برنامج *Fluent* أنّ الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s =$ $3.395\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.656\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.488$.



الشكل(4−12): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E1.7M5.8*

يبين الشكل(4−13) أنّ التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة تحت صوتي $(M_{2v} < 1)$. يبلغ التيار الثانوي سرعة الصوت في المنطقة الفعّالة عند نصف قطر $7[mm]$.

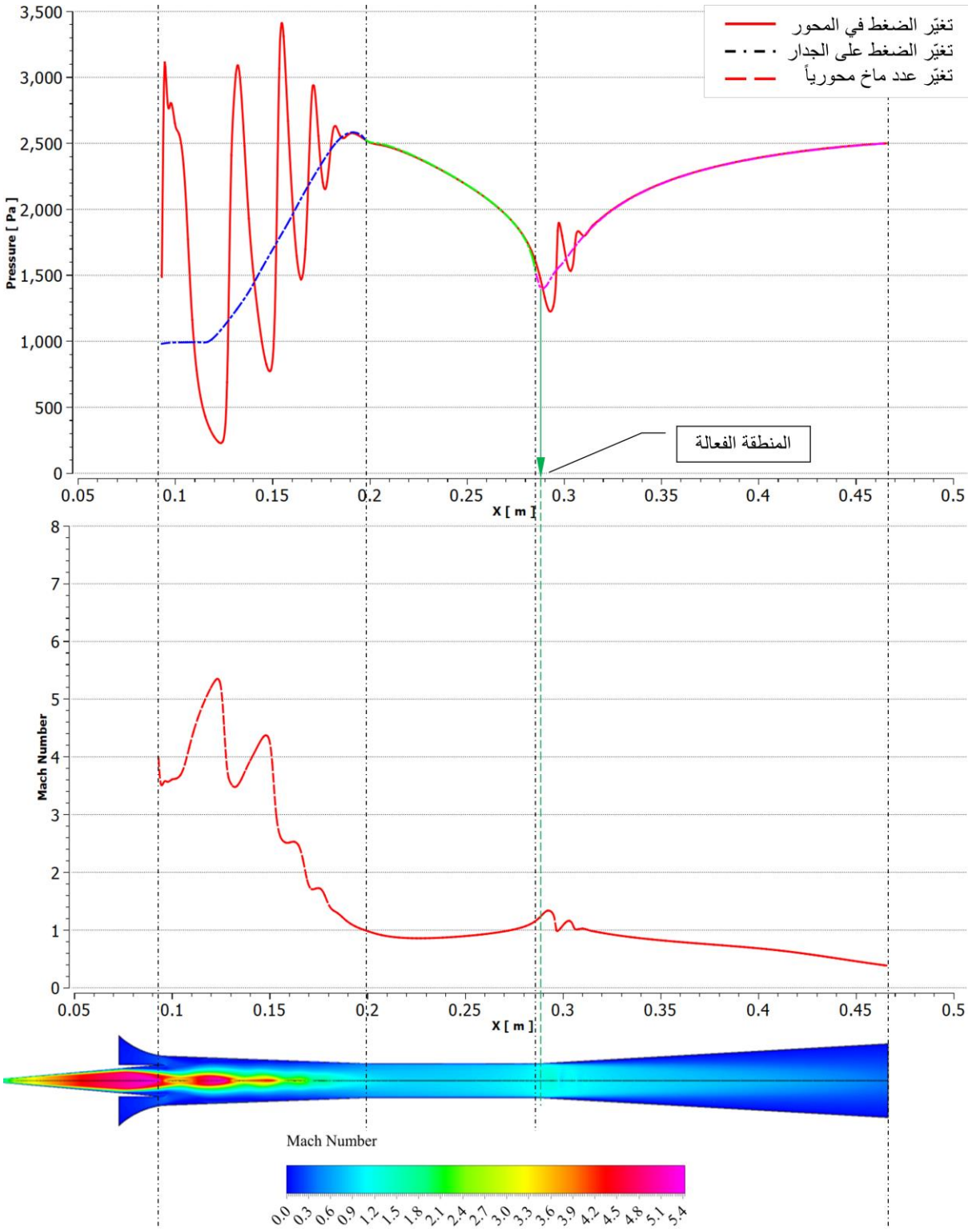


الشكل(4−13): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E1.7M5.8*

4−1−7 تحليل حقل الجريان في القاذف *E1.4M6*

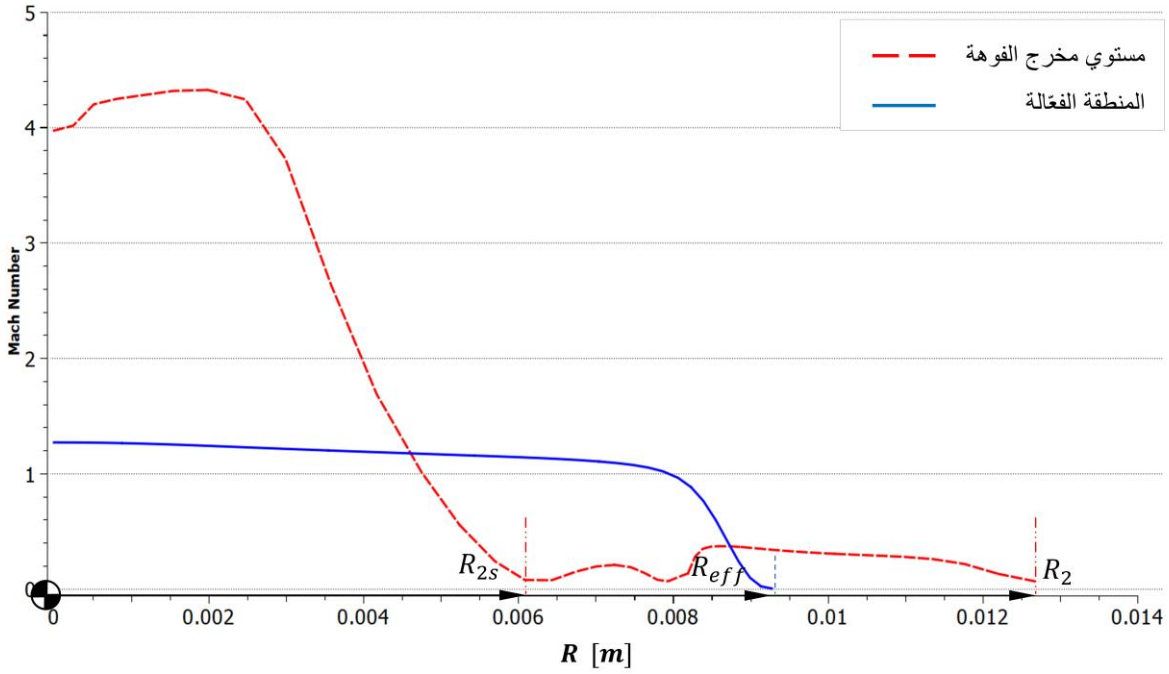
تكون موجات التمدد خلف الفوهة في القاذف *E1.4M6* ذات تمدد شديد أيضاً لأن الضغط الخلفي للفوهة أكبر من الضغط عند مخرج الفوهة حسب الشكل(4−14) لكن يُلاحظ أنّ تذبذبات الضغط كبيرة على طول المحور، وأنّ عدد ماخ الاعظمي 5.7 في حجرة المزج. يتبين في القاذف *E1.4M6* أن موجات التمدد شديدة والتيار الأولي متقارب نحو المحور لكن يوجد انفصال في التيار الأولي عن جدار الفوهة . إنّ المنطقة الفعّالة في هذه الحالة تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 285\ [mm]$.

تبين النتائج العددية المستخرجة من برنامج *Fluent* أنّ الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s =$ 3.398 $[kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 0.843\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.248$.



الشكل(4−14): تغيّر الضغط وعدد ماخ على طول القاذف *E1.4M6*

يبين الشكل(4−15) أنّ التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة تحت صوتي $(M_{2\nu} < 1)$. يبلغ التيار الثانوي سرعة الصوت في المنطقة الفعّالة.



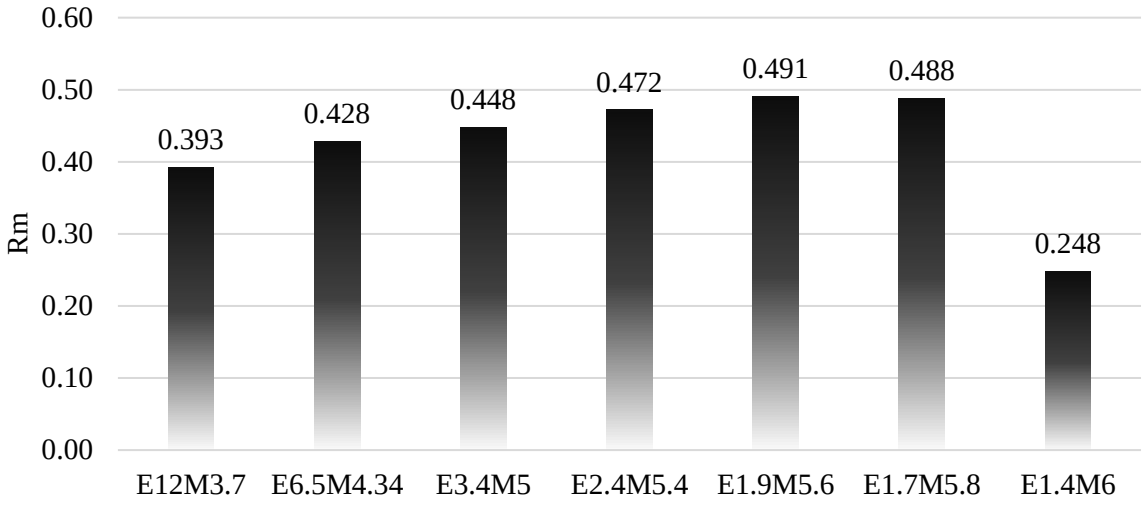
الشكل(4−15): تغيّر الضغط وعدد ماخ قطرياً في القاذف *E1.4M6*

4−1−8 مقارنة أداء القواذف في الحالات المدروسة

يبين الجدول(4−2) القواذف المدروسة لتأثير موجات التمدد على الأداء والتدفقات الكتلية للتيارين الأولي والثانوي ونسبة السحب الكتلي لكل حالة. إنّ نسبة السحب الكتلي للقاذف المصمم نظرياً $R_m = 0.428$، تزداد نسبة السحب الكتلي مع ازدياد عدد ماخ عند مخرج الفوهة حيث تتحول موجات التمدد خلف مخرج الفوهة من موجات تمدد ضعيفة الى موجات تمدد شديدة، تبلغ نسبة السحب الكتلي قيمة عظمى من أجل $M_{2s} = 5.15$ في القاذف *E1.9M5.6*، حيث تكون المنطقة الفعالة أقرب ما يكون من الفوهة بالمقارنة مع القواذف الأخرى. يؤدي ذلك إلى تكبير مجرى التيار الثانوي وبالتالي زيادة مساحة المقطع الحرج للتيار الثانوي مما يفسّر زيادة نسبة السحب الكتلي. يوضّح الشكل(4−16) نسب السحب الكتلي لكل قاذف مدروس.

الجدول(4−2): قيم البارامترات للقواذف المدروسة لدراسة تأثير موجات التمدد

القاذف	M_{2s} (القيمة العظمى) نظرياً / حاسوبياً	$\dot{m}_v\ [kg/h]$	$\dot{m}_s\ [kg/h]$	R_m	$x_{eff.}\ [mm]$
E12M3.7	3.508 / 3.7	1.330	3.389	0.393	131
E6.5M4.34	4.07 / 4.34	1.455	3.397	0.428	175
E3.4M5	4.63 / 5.00	1.521	3.393	0.448	158
E2.4M5.4	4.94 / 5.4	1.603	3.395	0.472	150
E1.9M5.6	5.15 / 5.6	1.666	3.394	0.491	145
E1.7M5.8	5.27 / 5.8	1.656	3.395	0.488	300
E1.4M6	4.326 / 6.00	0.843	3.398	0.248	285



الشكل(4−16): نسبة السحب الكتلي للقواذف المدروسة لدراسة تأثير موجات التمدد

4−2 تأثير مساحة مدخل التيار الثانوي على أداء القاذف البخاري

تقدّم هذه الفِقرة تحليلاً عددياً لدراسة تأثير تغيير مساحة مدخل التيار الثانوي على أداء القاذف البخاري من خلال تغيير أقطار كل من مخرج الفوهة ومدخل حجرة المزج. يتم دراسة تأثير مساحة مدخل التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة بتثبيت قطر مخرج الفوهة D_{2s} وتغيير قطر مدخل التيار الثانوي D_2.

تم دراسة أداء القاذف من أجل مساحات مختلفة لمقطع دخول التيار الثانوي، يبين الجدول(4−3) القواذف المدروسة لتأثير مساحة مدخل التيار الثانوي على الأداء كما يبين قيم المساحة النسبية لحجرة المزج (A_{2v}/A_{2s}). يتم ترميز القواذف المدروسة بحيث يشير العدد بعد الحرف E إلى نسبة المساحات والعدد بعد الحرف M للدلالة الى عدد ماخ عند مخرج الفوهة المحسوب من العلاقات النظرية. يمثّل القاذف *E6.5M4.34* الأبعاد التصميمية للقاذف وفق العلاقات النظرية (تم دراسته في الفِقرة 4−1−2)، وتم تعديل قطر مدخل التيار الثانوي في الحالات الأخرى بحيث يبقى قطر مخرج الفوهة ثابتاً $D_{2s} = 7.6\ [mm]$ أي عدد ماخ عند مخرج الفوهة ثابت $M_{2s} = 4.34$.

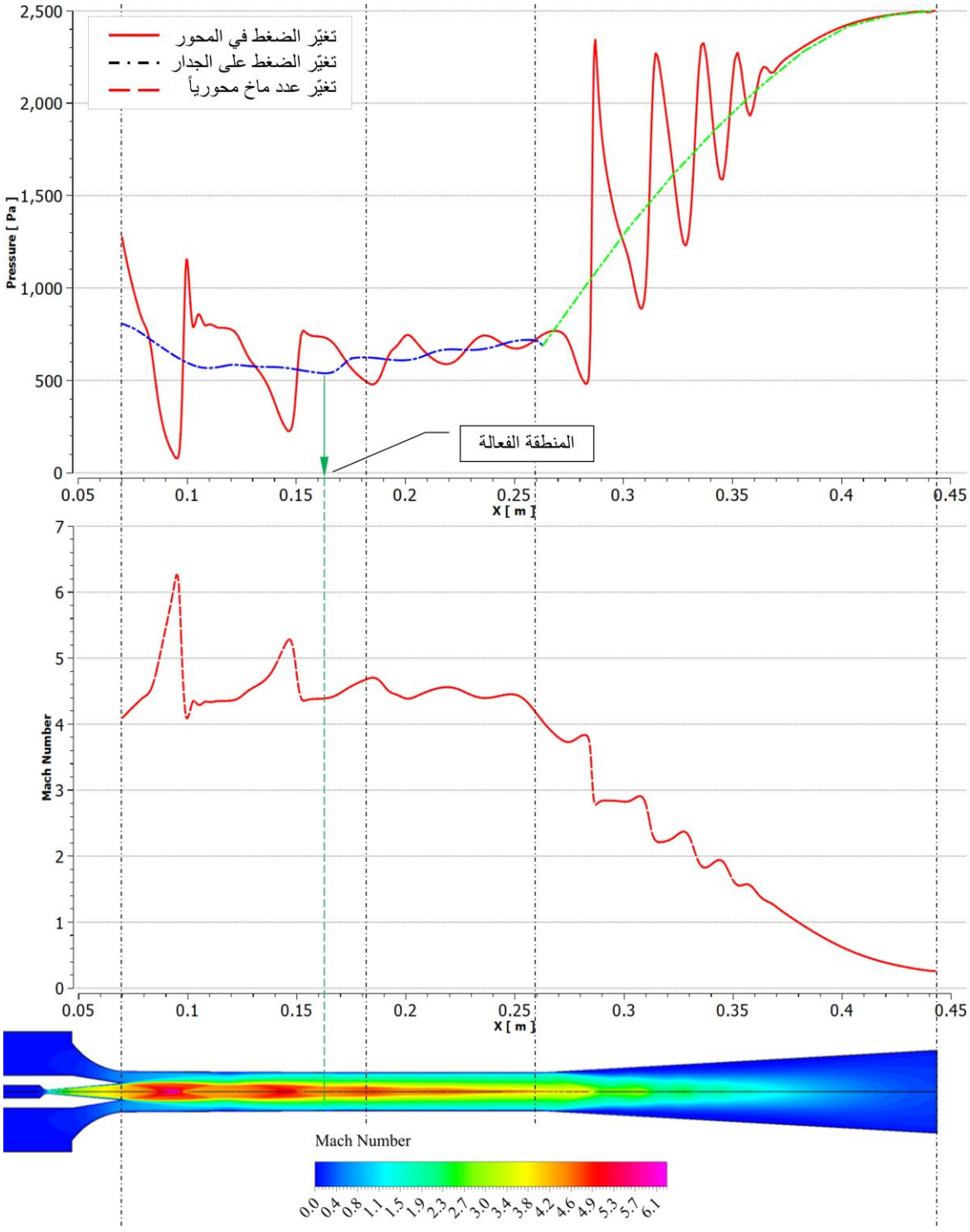
الجدول(4−3): أبعاد حجرة المزج في التصاميم المدروسة للقواذف لدراسة تأثير مساحة مقطع دخول التيار الثانوي

ترميز القاذف	E5M4.34	E5.6M4.34	E6.5M4.34	E7.5M4.34	E10M4.34	E12M4.34	E13M4.34
A_{2v}/A_{2s}	5	5.6	6.5	7.5	10	12	13
$D_2\ [mm]$	18.6	19.5	20.8	22.2	25.2	27.4	28.4
$D_{2s}\ [mm]$	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6

4−2−1 تحليل حقل الجريان في القاذف *E5M4.34*

يبين الشكل(4−17) أن المنطقة الفعّالة في هذا القاذف تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 162\ [mm]$ في نهاية حجرة المزج تقريباً، إنّ موجات التمدد خلف الفوهة ضعيفة ونواة التيار الأولي متباعدة وهذا ما يبينه التدرّج

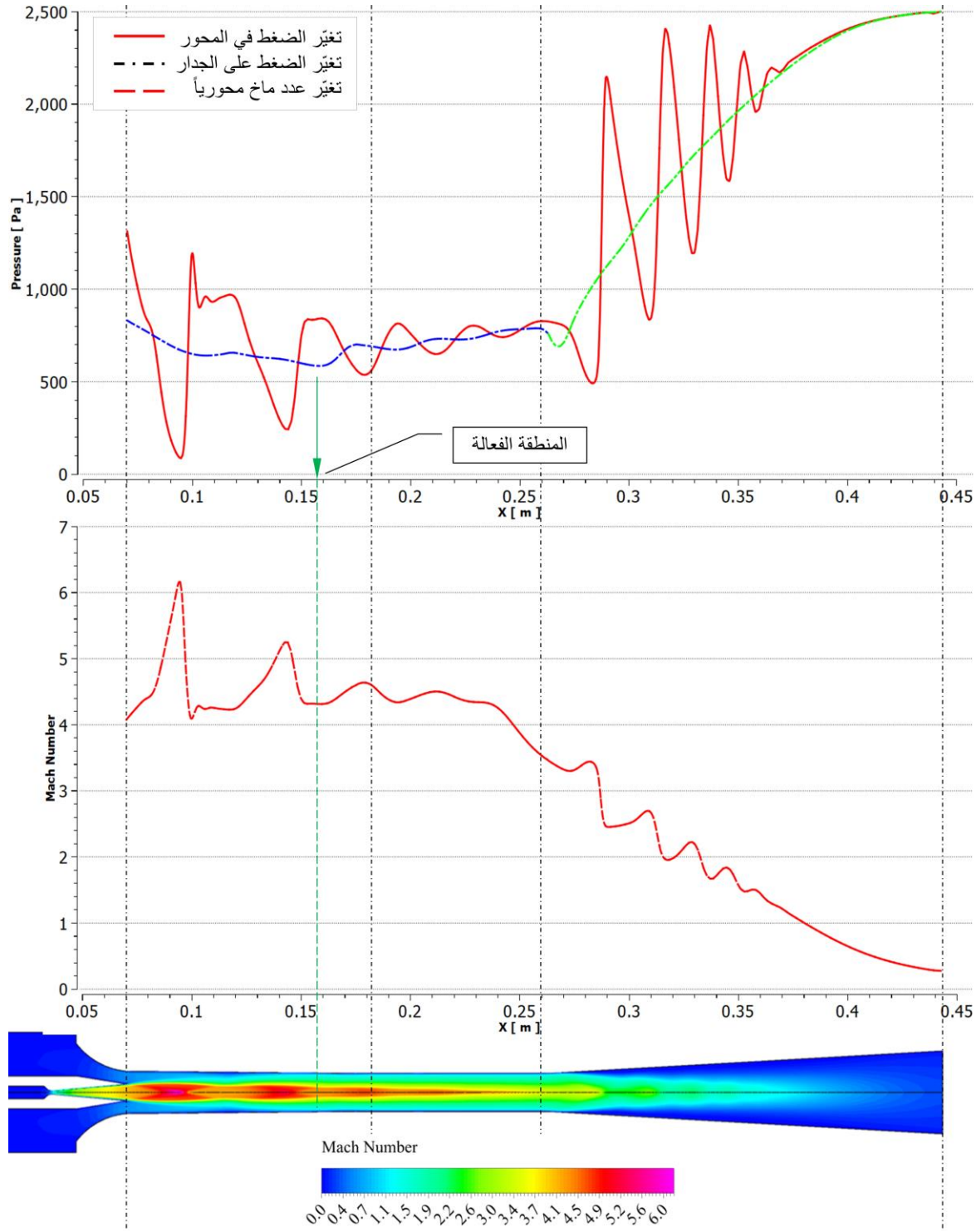
اللوني لعدد ماخ. يسبب هذا التباعد تضيّقاً في مجرى التيار الثانوي وبالتالي انخفاض تدفقه الكتلي ونسبة السحب الكتلي. تحدث سلسلتين من موجات الصدمة: الأولى في حجرة المزج والثانية في بداية الجزء المتباعد من الناشر. يبلغ عدد ماخ قيمة عظمى عند المحور في حجرة المزج $M = 6$ ثم ينخفض بشكل مفاجئ في بداية الجزء المتباعد للناشر حيث تحدث سلسلة من موجات الصدمة المائلة، ويصبح الجريان تحت صوتي في نهاية الناشر.



الشكل(4–17): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E5M4.34*

4-2-2 تحليل حقل الجريان في القاذف *E5.6M4.34*

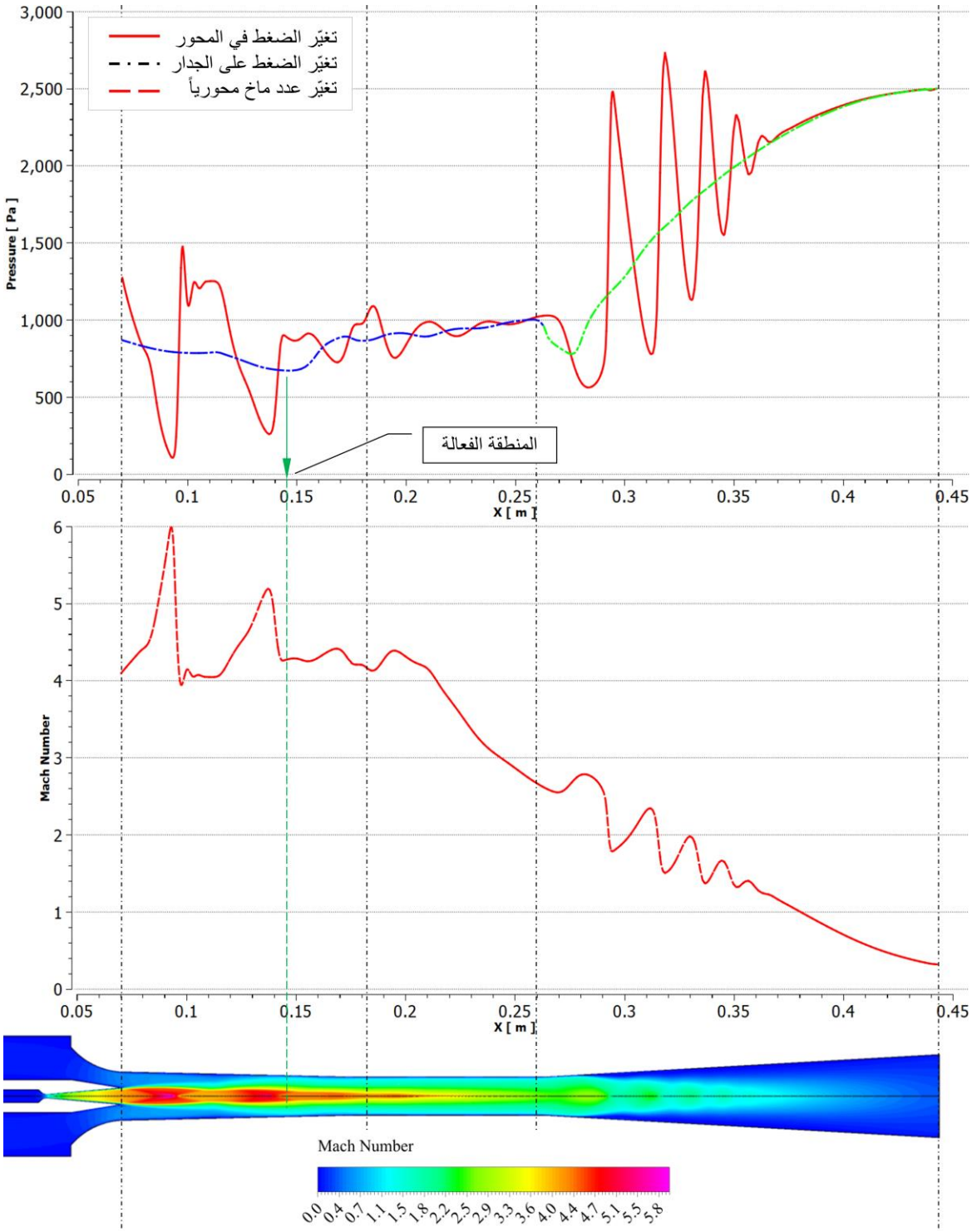
يبين الشكل(4-18) أن تغير الضغط وعدد ماخ في هذا القاذف شبه مطابق لمثيلاتها في القاذف *E5M4.34*، لكن موجات التمدد الضعيفة تشكّل نواة تيار أولي أصغر قليلاً مما يسمح لمجرى التيار الثانوي بتمرير كمية أكبر قليلاً من بخار التيار الثانوي وبالتالي زيادة في نسبة السحب الكتلي. يبين الشكل كذلك التدرّج اللوني لعدد ماخ. تقترب المنطقة الفعّالة قليلاً من الفوهة حيث تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 158\ [mm]$.



الشكل(4-18): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E5.6M4.34*

4−2−3 تحليل حقل الجريان في القاذف *E7.5M4.34*

يبين الشكل(4−19) تغيّر الضغط على طول القاذف *E7.5M4.34* ، تقترب المنطقة الفعّالة في هذه الحالة نحو مخرج الفوهة حيث تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 145\ [mm]$ مما يزيد من مساحة مقطع التيار الثانوي، تبقى موجات التمدد ضعيفة لكن ليس كما هو الحال في القاذف *E5M4.34* و *E5.6M4.34* وتصبح نواة نفاثة التيار الأولي أضيق قليلاً وهذا ما يبينه التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل. يؤدي ذلك إلى ازدياد التدفق الكتلي للتيار الثانوي وبالتالي نسبة السحب الكتلي. يبلغ عدد ماخ قيمة عظمى عند المحور في حجرة المزج $M = 6$ ثم ينخفض تدريجياً في عنق الناشر. تحدث سلسلتين من موجات الصدمة: الأولى في حجرة المزج والثانية في بداية الجزء المتباعد من الناشر، ويصبح الجريان تحت صوتي في نهاية الناشر على المحور. تنتهي السلسلة الأولى من موجات الصدمة مبكراً في عنق الناشر باتجاه الفوهة بالمقارنة مع الحالتين السابقتين.

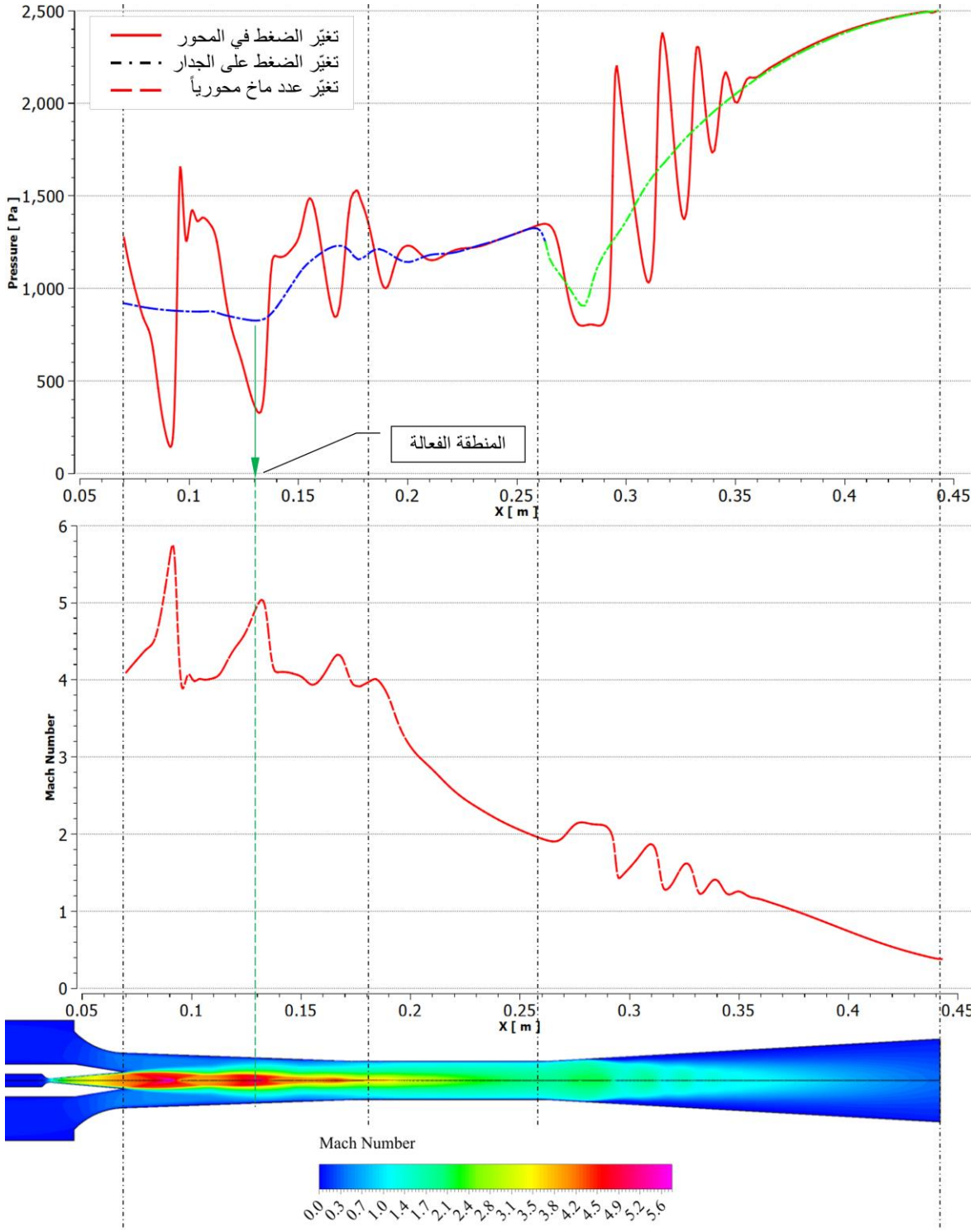


الشكل(4−19): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E7.5M4.34*

4−2−4 تحليل حقل الجريان في القاذف *E10M4.34*

لا يختلف تغيّر الضغط على طول القاذف *E10M4.34* عنه في القاذف *E7.5M4.34* إلا أن المنطقة الفعّالة في هذه الحالة تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 130\ [mm]$ كما يبين الشكل(4−20) مما يزيد من مساحة مقطع التيار الثانوي. إن الضغط الخلفي في حجرة المزج أقل من ضغط مخرج الفوهة بقليل، بالتالي فإنّ موجات

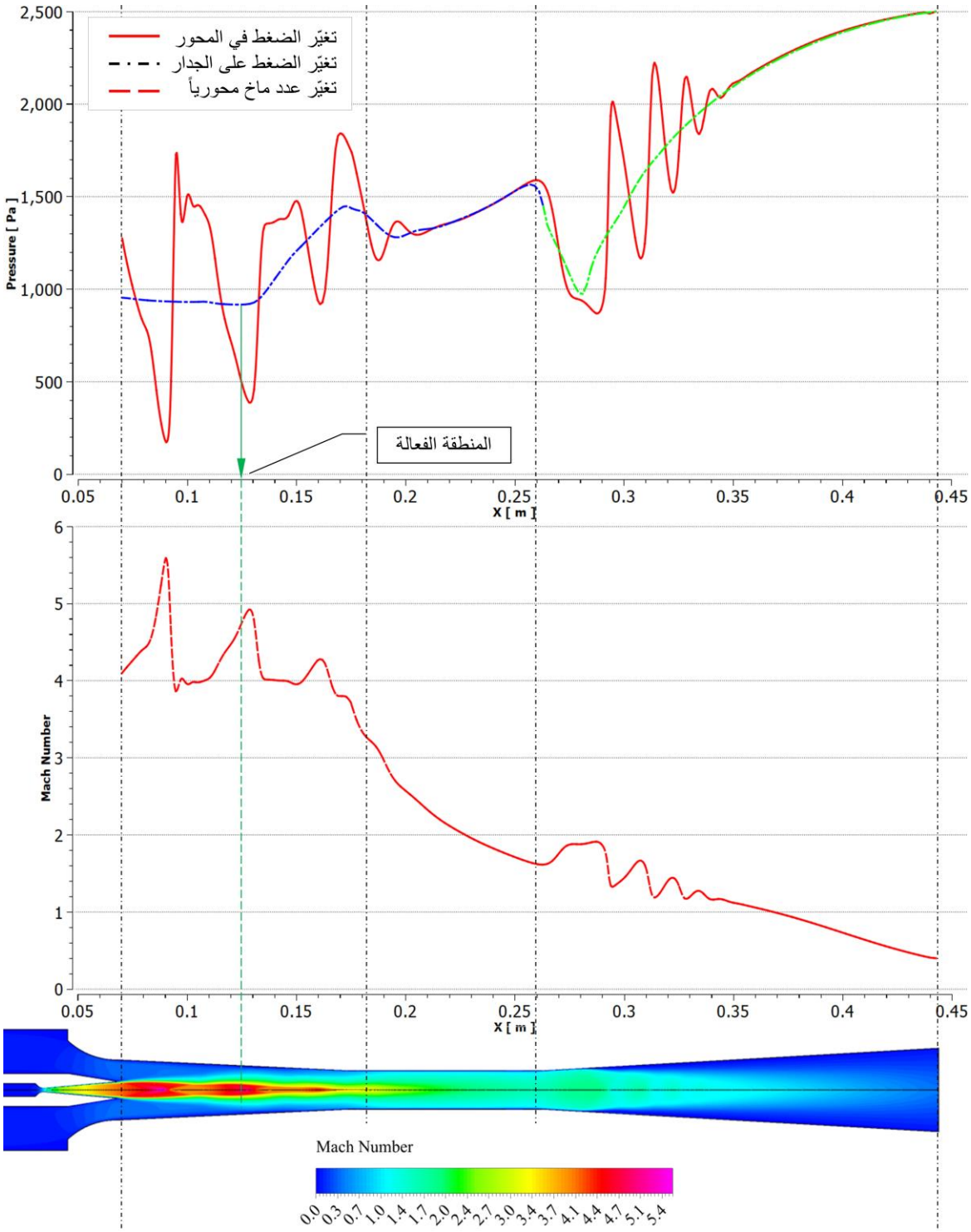
التمدد خلف الفوهة هي موجات تمدد ضعيف، ونواة نفاثة التيار الأولي أضيق قليلاً وهذا ما يبينه التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل، يؤدي ذلك إلى ازدياد التدفق الكتلي للتيار الثانوي وبالتالي نسبة السحب الكتلي. تحدث سلسلة من موجات الصدمة المائلة في بداية الجزء المتباعد من الناشر أيضاً، ويصبح الجريان تحت صوتي في نهاية الناشر على المحور. تنتهي السلسلة الأولى من موجات الصدمة في بداية عنق القاذف تقريباً



الشكل(4–20): تغيّر الضغط وعدد ماخ في القاذف *E10M4.34*

4-2-5 تحليل حقل الجريان في القاذف *E12M4.34*

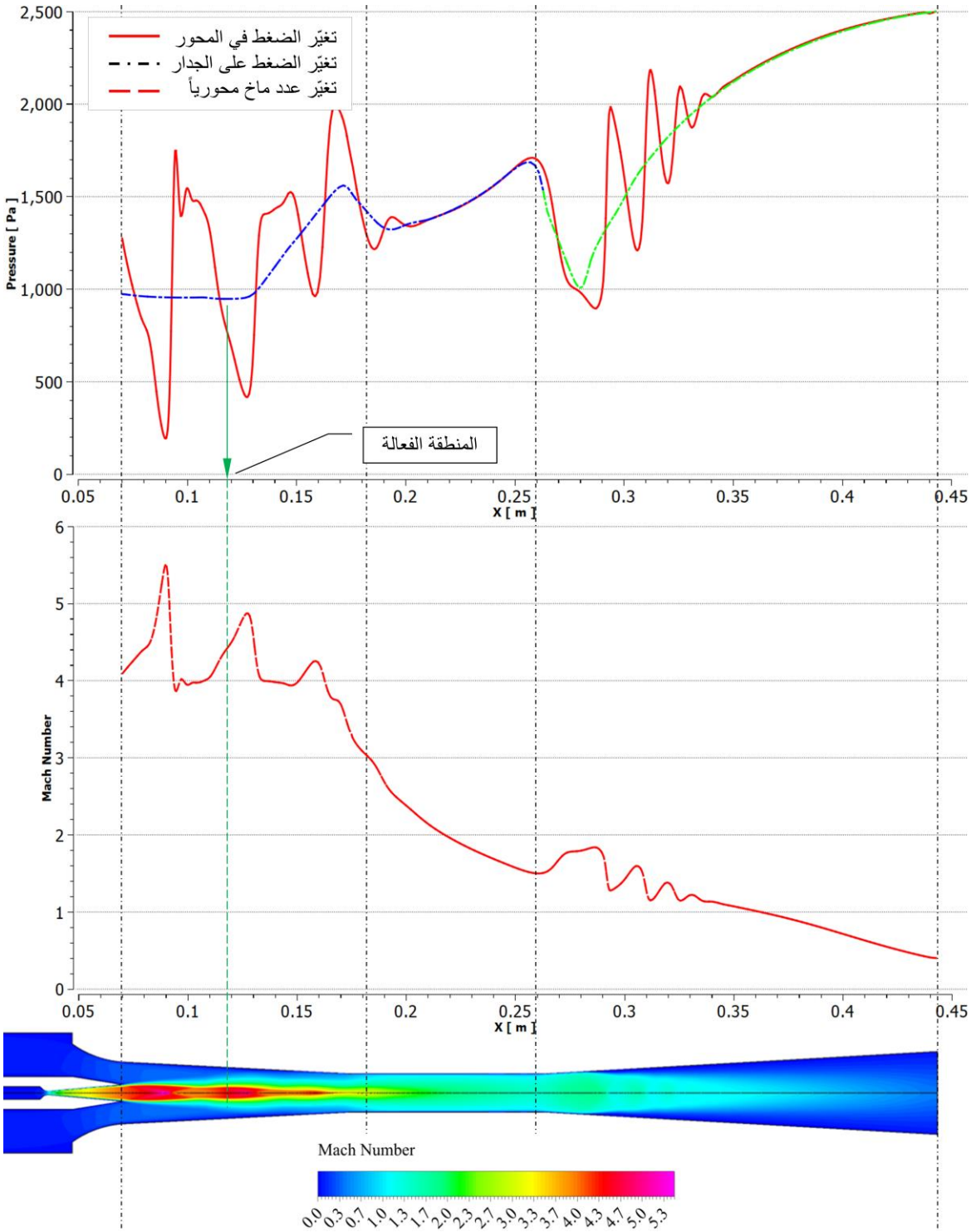
يُلاحظ من تغيّر الضغط على طول القاذف *E12M4.34* كما يبين الشكل(4-21) أن موجات التمدد خلف الفوهة موجات تمدد شديد وتصبح نواة نفاثة التيار الأولي أضيق أكثر. تتراجع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة نحو مخرج الفوهة حيث تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 125\ [mm]$ مما يزيد من مساحة مقطع التيار الثانوي، تمثّل هذه الحالة أكبر مساحة ممكنة لمجرى التيار الثانوي حيث يمر أكبر كمية من بخار التيار الثانوي.



الشكل(4-21): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E12M4.34*

4-2-6 تحليل حقل الجريان في القاذف *E13M4.34*

لا يختلف تغيّر الضغط على طول القاذف في هذه الحالة عن الحالة السابقة إلّا أن المنطقة الفعّالة في هذه الحالة تقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 118\ [mm]$ كما يبين الشكل(4-22). إن موجات التمدد خلف الفوهة موجات تمدد شديدة لأن الضغط الستاتيكي خلف الفوهة أكبر من ضغط مخرج الفوهة. يزداد الضغط الستاتيكي في المنطقة الفعّالة في هذه الحالة مسبباً تناقصاً في التدفق الكتلي للتيار الثانوي وبالتالي انخفاض نسبة السحب.



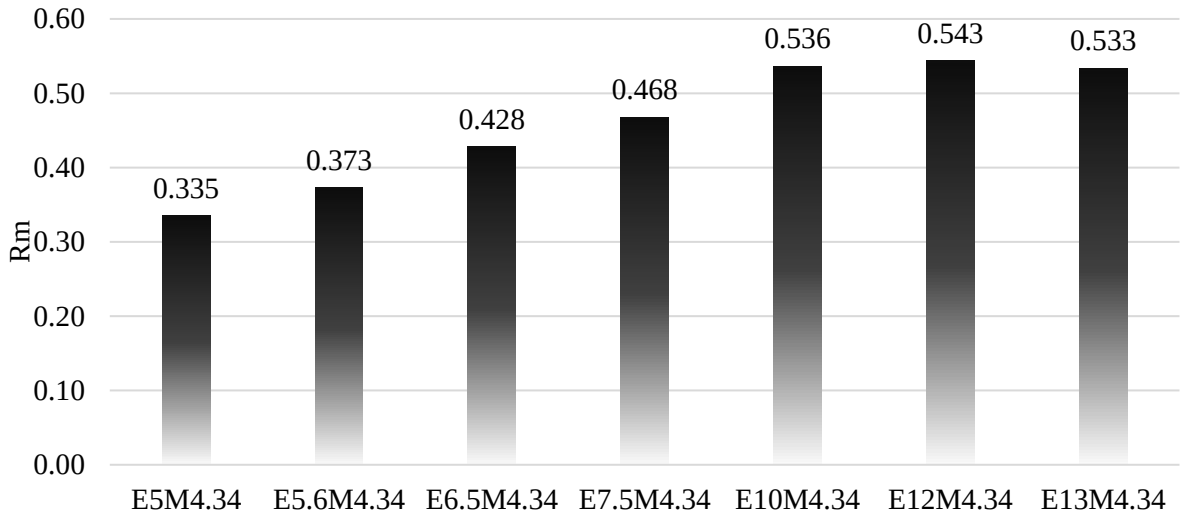
الشكل(4-22): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E13M4.34*

4-2-7 مقارنة أداء القواذف في الحالات المدروسة

يبين الجدول(4-4) القواذف المدروسة لتأثير مساحة مدخل التيار الثانوي على الأداء والتدفقات الكتلية للتيارين الأولي والثانوي ونسبة السحب الكتلي لكل حالة. إنّ نسبة السحب الكتلي للقاذف المصمم نظرياً $R_m = 0.428$، تزداد نسبة السحب الكتلي مع ازدياد المساحة النسبية لحجرة المزج A_{2v}/A_{2s} إلى أن تبلغ قيمة عظمى عند $A_{2v}/A_{2s} = 12$ في القاذف *E12M4.34*. حيث تكون المنطقة الفعالة قريبة من الفوهة بالمقارنة مع القواذف الأخرى. يؤدي ذلك إلى تكبير مجرى التيار الثانوي وبالتالي زيادة مساحة المقطع الحرج للتيار الثانوي مما يفسّر زيادة نسبة السحب الكتلي. يوضّح الشكل(4-23) نسب السحب الكتلي لكل قاذف مدروس.

الجدول(4-4): قيم البارامترات للقواذف المدروسة لدراسة تأثير مساحة مدخل التيار الثانوي

القاذف	$\dot{m}_v\ [kg/h]$	$\dot{m}_s\ [kg/h]$	R_m	$x_{eff.}\ [mm]$
E5M4.34	1.136	3.389	0.335	162
E5.6M4.34	1.265	3.394	0.373	158
E6.5M4.34	1.455	3.397	0.428	175
E7.5M4.34	1.584	3.389	0.468	145
E10M4.34	1.816	3.389	0.536	130
E12M4.34	1.841	3.389	0.543	125
E13M4.34	1.807	3.389	0.533	118



الشكل(4-23): نسبة السحب الكتلي للقواذف المدروسة لدراسة تأثير مساحة مدخل التيار الثانوي

4-3 تأثير مساحة مخرج الفوهة على أداء القاذف البخاري مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي

تقدّم هذه الفِقرة تحليلاً عددياً لدراسة تأثير تغيير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي عند مستوي مخرج الفوهة D_2 على أداء القاذف البخاري، تتغير في هذه الحالة مساحة كل من مخرج الفوهة ومدخل

التيار الثانوي. تمت دراسة أداء القاذف من أجل قيم مختلفة للمساحة النسبية لحجرة المزج (A_{2v}/A_{2s})، يبين الجدول(4−5) القواذف المدروسة ونسب المساحات. يتم ترميز القواذف المدروسة كما في الفقرتين السابقتين.

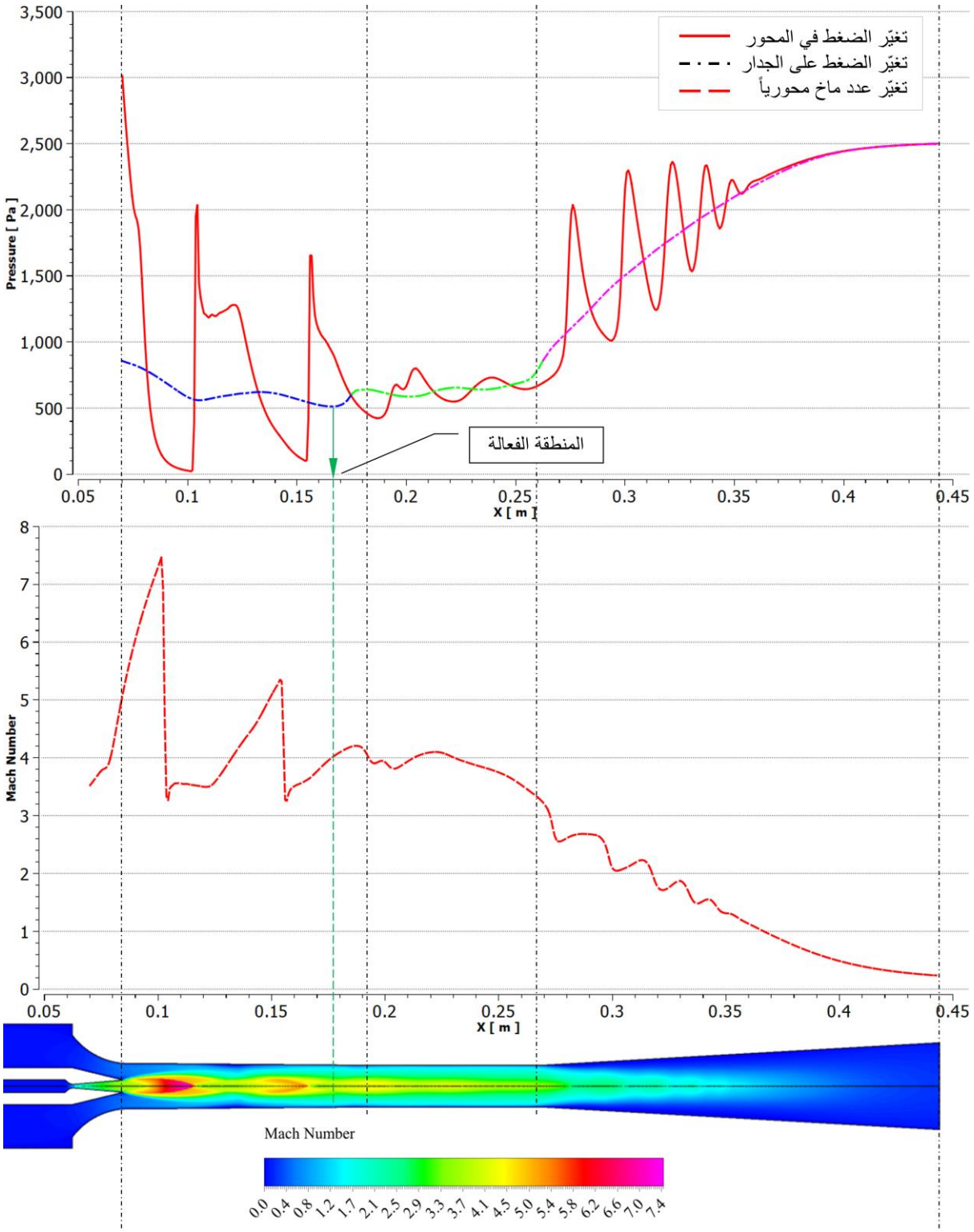
الجدول(4−5): أبعاد حجرة المزج في التصاميم المدروسة للقواذف لدراسة تأثير تغيير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل الناشر

ترميز القاذف	E12.8M3.7	E11M3.84	E6.5M4.34	E4.7M4.6	E2.9M5	E2.4M5.3
A_{2v}/A_{2s}	12.8	11	6.5	4.7	2.9	2.0
$D_2\ [mm]$	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
$D_{2s}\ [mm]$	5.6	6.0	7.6	8.7	10.5	12

4−3−1 تحليل حقل الجريان في القاذف *E12.8M3.7*

يُلاحظ من تغيّر الضغط على طول القاذف *E12.8M3.7* في الشكل(4−24) أن الضغط الخلفي في حجرة المزج أقل من الضغط عند مخرج الفوهة بالتالي فإنّ موجات التمدد خلف الفوهة ذات تمدد ضعيف وبالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متباعداً عن محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل كما يتبين وجود موجات صدمة مائلة على طول القاذف. تقع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة عند الاحداثي $x_{eff.} = 168\ [mm]$.

يبلغ التدفق الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s = 3.404\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.495\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.439$.



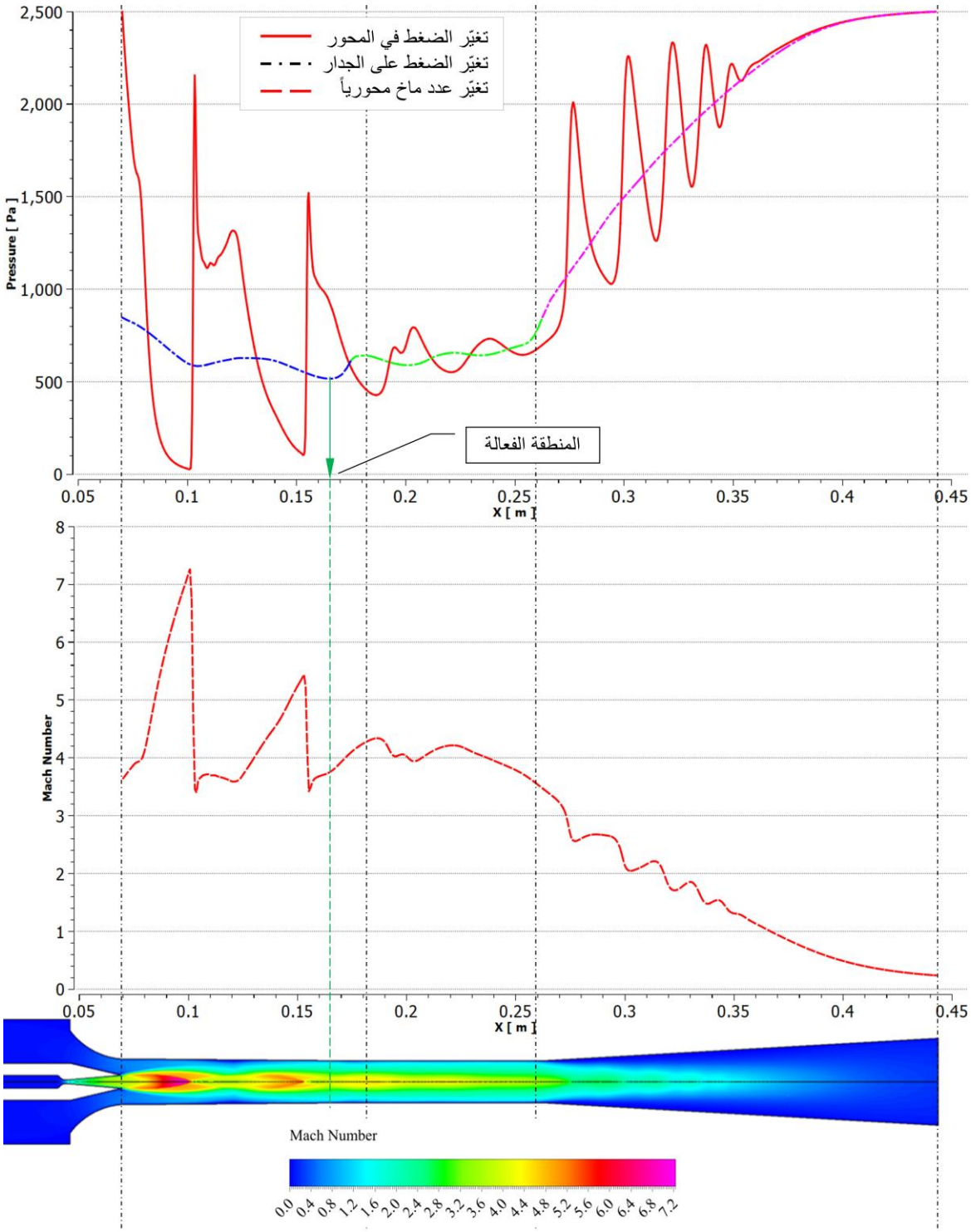
الشكل(4–24): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E12.8M3.7*

4–3–2 تحليل حقل الجريان في القاذف *E11M3.84*

يُلاحظ من تغيّر الضغط على طول القاذف *E11M3.84* في الشكل(4–25) أن الضغط الخلفي في حجرة المزج أقل من الضغط عند مخرج الفوهة بالتالي فإنّ موجات التمدد خلف الفوهة ذات تمدد ضعيف وبالتالي

فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متباعداً عن محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل كما يتبين وجود موجات صدمة مائلة على طول القاذف. تتراجع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة نحو مخرج الفوهة بالمقارنة مع الحالة السابقة وتقع عند الاحداثي $x_{eff.} = 165\ [mm]$.

يبلغ التدفق الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s = 3.404\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.511\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.444$.

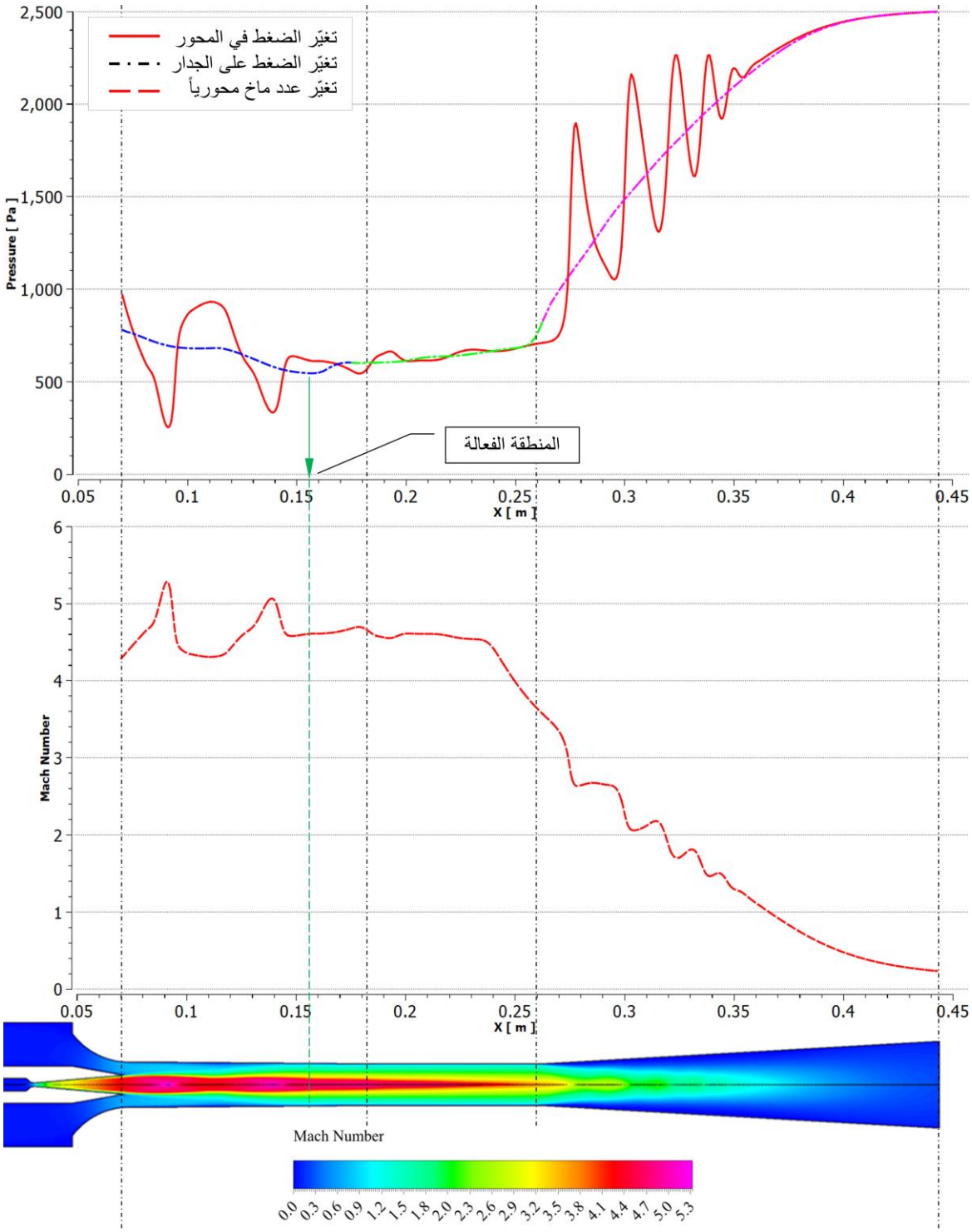


الشكل(4–25): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E11M3.84*

4-3-3 تحليل حقل الجريان في القاذف *E4.7M4.6*

يُلاحظ من تغيّر الضغط على طول القاذف *E4.7M4.6* في الشكل(4-26) أن الضغط الخلفي في حجرة المزج أقل من الضغط عند مخرج الفوهة لكن بصورة أقل بكثير مما هو عليه في الحالتين السابقتين، أي أن موجات التمدد في هذه الحالة تتجه لأن تكون ذات تمدد شديد وبالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متقارباً إلى محور القاذف عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل كما يتبين وجود موجات صدمة مائلة عند بداية الجزء المتباعد للناشر. تقع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة عند الاحداثي $x_{eff.} = 155\ [mm]$.

يبلغ التدفق الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s = 3.398\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.528\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.450$.



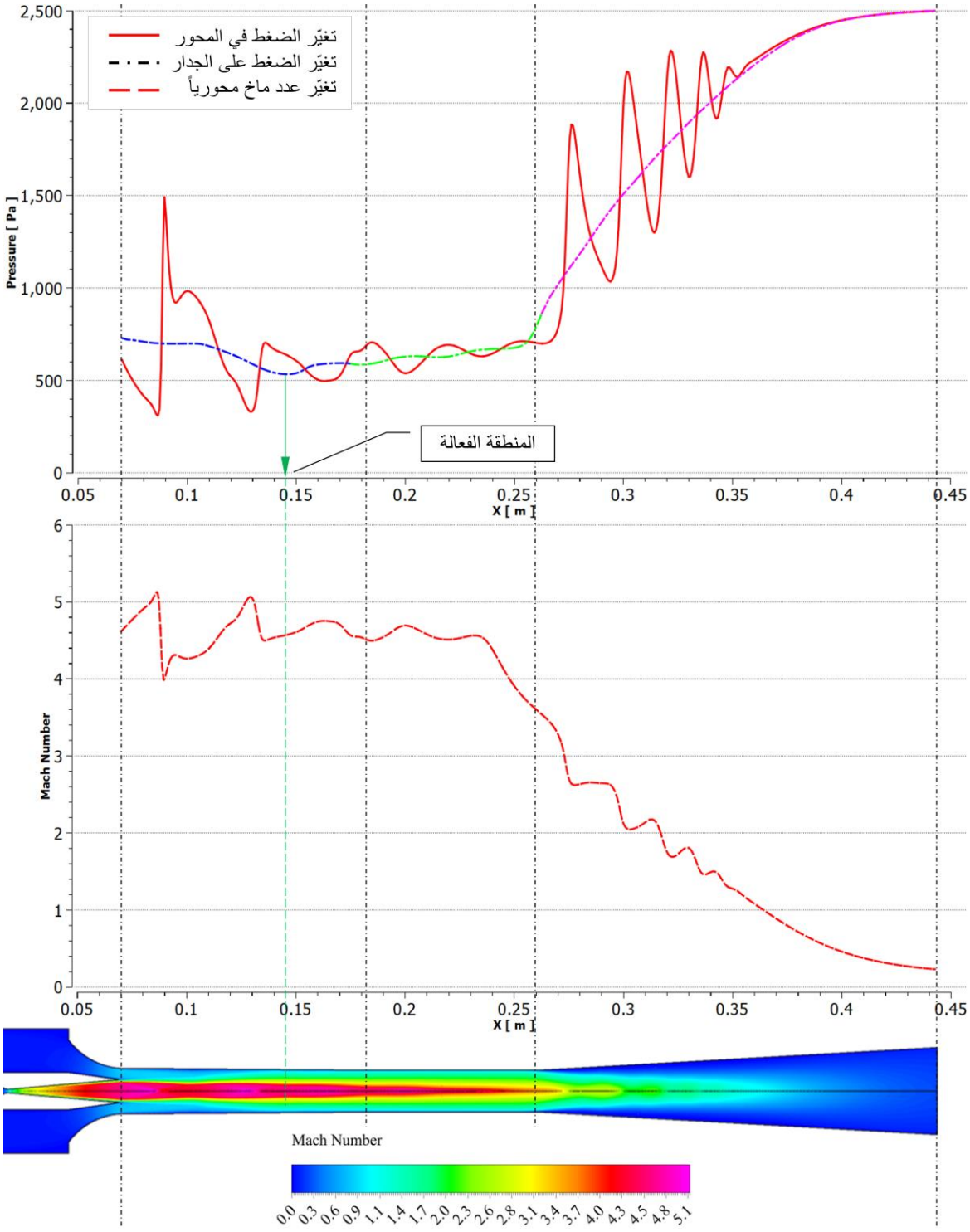
الشكل(4–26): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E4.7M4.6*

4–3–4 تحليل حقل الجريان في القاذف *E2.9M5*

يُلاحظ من تغيّر الضغط على طول القاذف *E2.9M5* في الشكل(4–27) أن الضغط الخلفي في حجرة المزج أكبر من الضغط عند مخرج الفوهة بالتالي فإنّ موجات التمدد خلف الفوهة ذات تمدد شديد وبالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متقارباً الى المحور عند مخرج الفوهة ويُلاحظ بدء انفصال الجريان للتيار الأولي عند

مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل كما يتبين وجود موجات صدمة مائلة عند بداية الجزء المتباعد من الناشر. تقع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة عند الاحداثي $x_{eff.} = 145\ [mm]$.

يبلغ التدفق الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s = 3.398\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.473\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.433$.

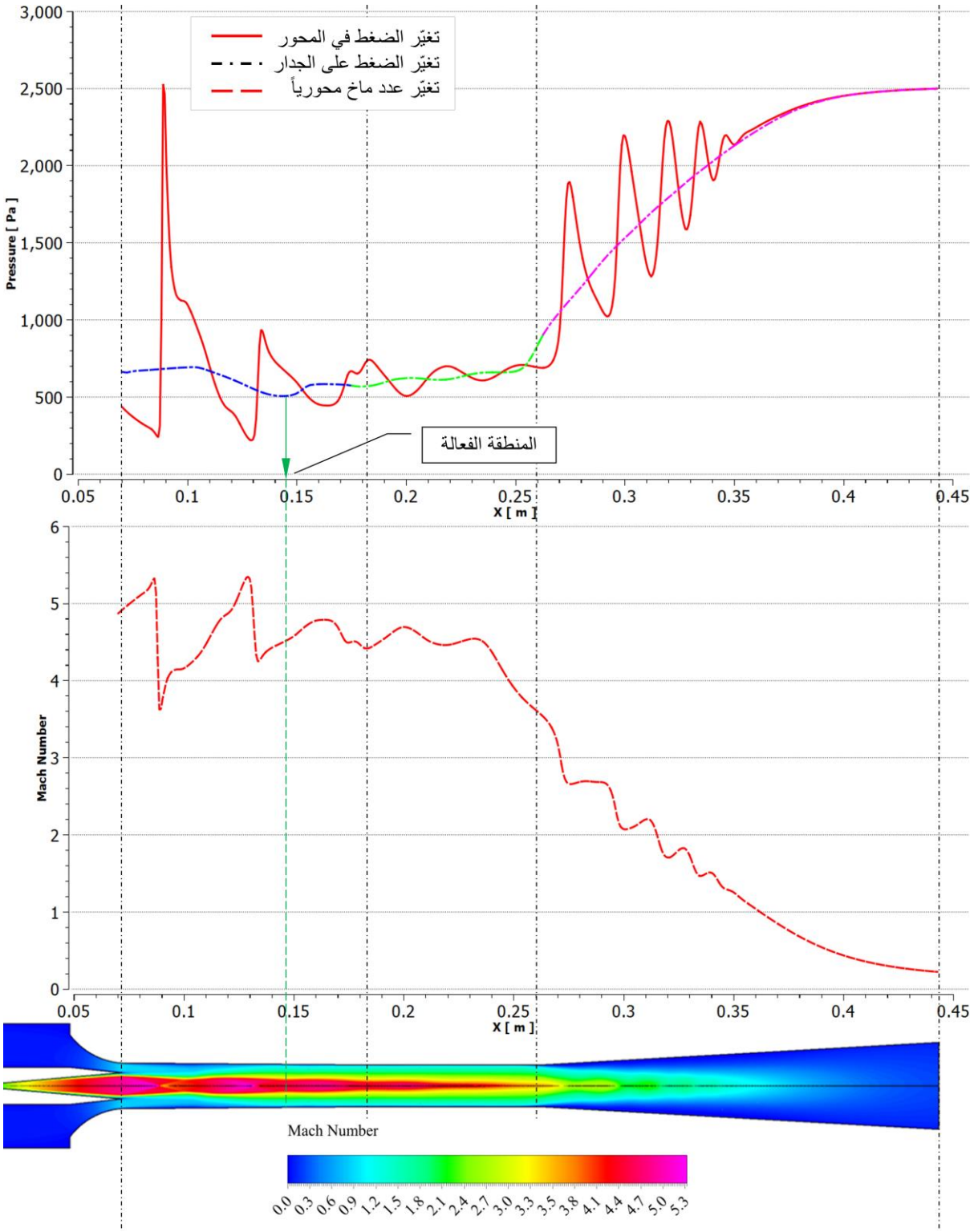


الشكل(4−27): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E2.9M5*

4-3-5 تحليل حقل الجريان في القاذف *E2.4M5.3*

يُلاحظ من تغيّر الضغط على طول القاذف *E2.4M5.3* في الشكل(4-28) أن الضغط الخلفي في حجرة المزج أكبر من الضغط عند مخرج الفوهة بالتالي فإنّ موجات التمدد خلف الفوهة ذات تمدد شديد وبالتالي فإن نواة التيار الأولي تأخذ شكلاً متقارباً إلى محور القاذف عند مخرج الفوهة ويُلاحظ انفصال الجريان للتيار الأولي عند مخرج الفوهة كما هو مبين من التدرّج اللوني لعدد ماخ في الشكل كما يتبين وجود موجات صدمة مائلة على طول القاذف. تقع المنطقة الفعّالة في هذه الحالة عند الاحداثي $x_{eff.} = 145\ [mm]$.

يبلغ التدفق الكتلي للتيار الأولي في هذه الحالة $\dot{m}_s = 3.398\ [kg/min]$، والتدفق الكتلي للتيار الثانوي $\dot{m}_v = 1.392\ [kg/min]$ وبالتالي نسبة السحب الكتلي $R_m = 0.410$.



الشكل(4–28): تغيّر الضغط و عدد ماخ في القاذف *E2.4M5.3*

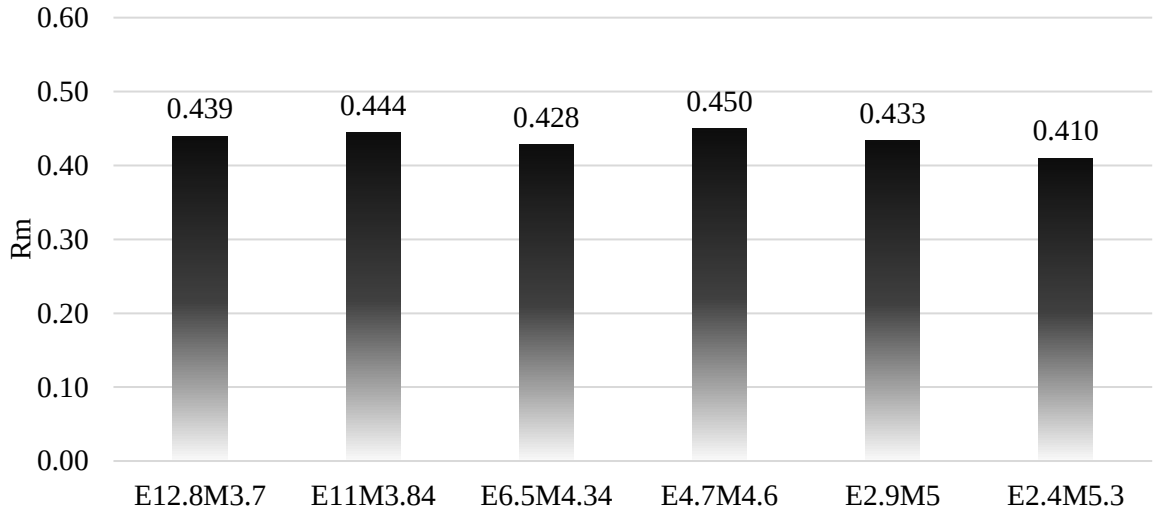
4–3–6 مقارنة أداء القواذف في الحالات المدروسة

يبين الجدول(4–6) القواذف المدروسة لتأثير تغيير مساحة مخرج الفوهة على الأداء والتدفقات الكتلية للتيارين الأولي والثانوي ونسبة السحب الكتلي لكل حالة. تزداد نسبة السحب الكتلي مع ازدياد أو انخفاض المساحة

النسبية لحجرة المزج A_{2v}/A_{2s} بدءاً من الحالة التصميمية النظرية أي في القاذف *E6.5M4.34*. تبلغ نسبة السحب الكتلي قيمة عظمى من أجل نسبة المساحة $A_{2v}/A_{2s} = 4.7$ في القاذف *E4.7M4.6*. يوضّح الشكل(4−29) نسب السحب الكتلي لكل قاذف مدروس. يُلاحظ تراجع المنطقة الفعالة في كل من القاذف *E4.7M4.6* و *E11M3.84* حيث تزداد نسبة السحب الكتلي في كل منهما بالمقارنة مع مثيلتها في التصميم النظري.

الجدول(4−6): قيم البارامترات للقواذف المدروسة لدراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي

القاذف	$\dot{m}_v\ [kg/h]$	$\dot{m}_s\ [kg/h]$	R_m	$x_{eff.}\ [mm]$
E12.8M3.7	1.495	3.404	0.439	168
E11M3.84	1.511	3.404	0.444	165
E6.5M4.34	1.455	3.397	0.428	175
E4.7M4.6	1.528	3.398	0.450	155
E2.9M5	1.473	3.398	0.433	145
E2.4M5.3	1.392	3.399	0.410	145

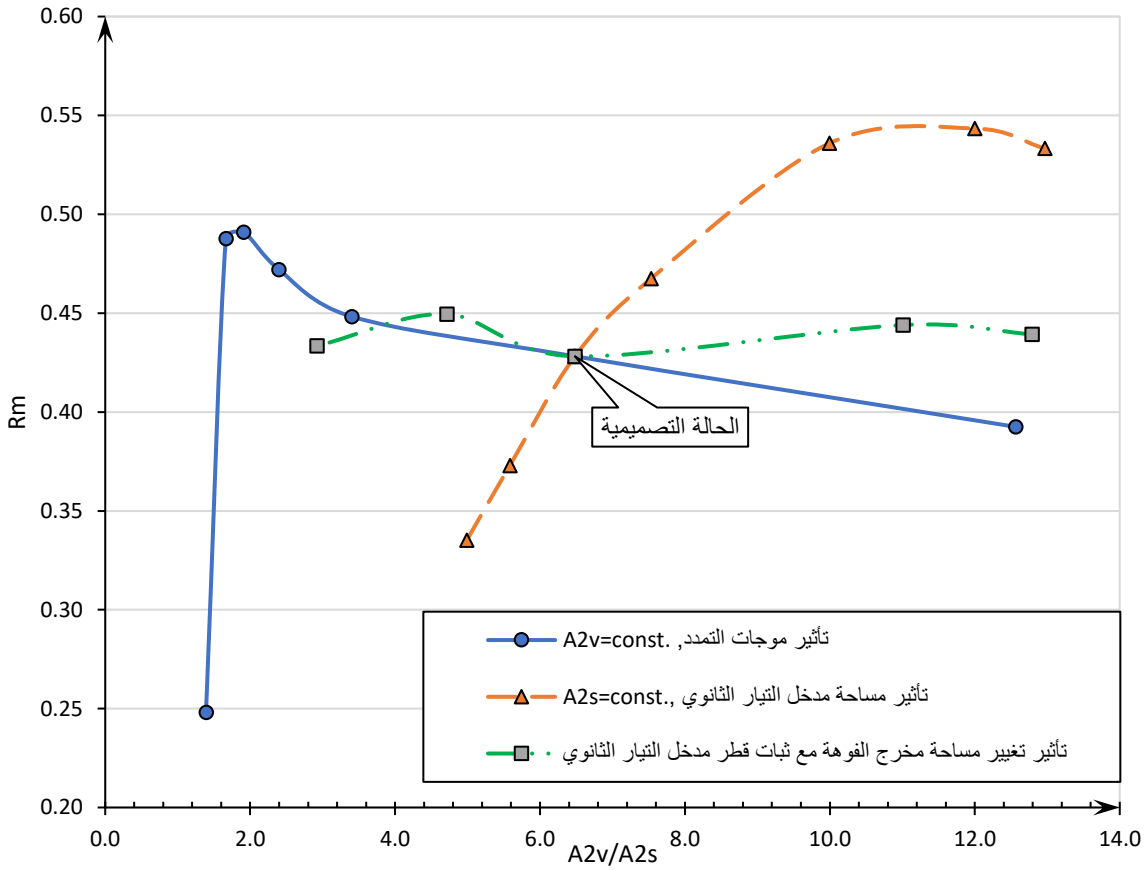


الشكل(4−29): نسبة السحب الكتلي للقواذف لدراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي

4−4 تأثير تغيّر المساحة النسبية لحجرة المزج على أداء القاذف البخاري

يلخّص الشكل(4−30) تأثير المساحة النسبية لحجرة المزج على نسبة السحب الكتلي في الحالات الثلاث المدروسة في الفقرات السابقة. يُلاحَظ أنّ أداء التصميم النظري للقاذف البخاري ليس أعظمياً حيث يجب تخفيض المساحة النسبية لحجرة المزج في حال تغيير قطري مخرج الفوهة D_{2s} ومدخل التيار الثانوي D_2 بحيث تبقى مساحة مدخل التيار الثانوي ثابتة $A_{2v} = const.$، تبلغ القيمة العظمى لنسبة السحب الكتلي في هذه الحالة $R_m = 0.491$، وفي حال تغيير قطر مدخل التيار الثانوي فقط مع ثبات مساحة مخرج الفوهة $A_{2s} = const.$ فيجب تعديل التصميم النظري بزيادة المساحة النسبية لحجرة المزج حيث تبلغ نسبة السحب الكتلي قيمة عظمى في

هذه الحالة عند $A_{2v}/A_{2s} = 12$ وتساوي 0.543. ومن أجل تغيير مخرج الفوهة فقط فيجب تخفيض المساحة النسبية لحجرة المزج إلى $A_{2v}/A_{2s} = 4.7$ لتبلغ نسبة السحب الكتلي قيمة عظمى 0.45 في هذه الحالة.



الشكل(4–30): علاقة نسبة السحب الكتلي بالمساحة النسبية لحجرة المزج

يوضّح الجدول(4–7) معاملات تصحيح تصميمية لتعديل أقطار القاذف البخاري المصمم نظرياً وذلك من أجل شروط التشغيل المدروسة الموضحة في الجدول(3–2). تمثّل المعاملات ξ_1, ξ_2, ξ_3 معاملات تصحيح لأقطار مخرج الفوهة ومدخل التيار الثانوي وللمساحة النسبية لحجرة المزج $D_{2s}, D_2, A_{2v}/A_{2s}$ على التتالي.

الجدول(4–7): معاملات التصحيح التصميمية

ξ_3	ξ_2	ξ_1	A_{2v}/A_{2s}	D_2 [mm]	D_{2s} [mm]	
-	-	-	6.5	20.8	7.602	***E6.5M4.34***
0.294883	1.14875	1.84151	1.9	23.9	14.0	***E1.9M5.6***
1.851196	1.317688	0.99968	12.0	27.4	7.600	***E12M4.34***
0.727128	1	1.14437	4.7	20.8	8.70	***E4.7M4.6***

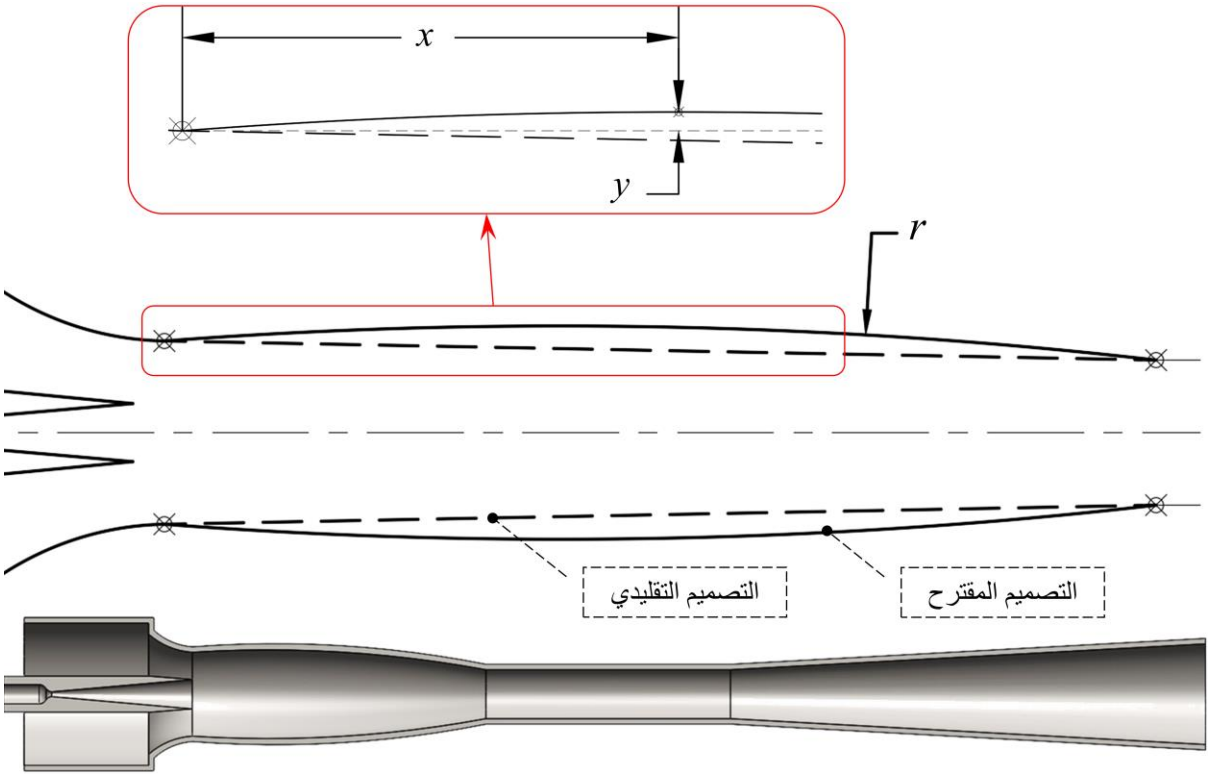
الفصل الخامس

التصميم الهندسي الجديد المقترح لحجرة المزج

New Proposed Geometry Design of Mixing Chamber

كان اختبار وتطوير الشكل الهندسي للقواذف التقليدية يتم تجريبياً منذ اقتراح نظرية الجريان وحيد البعد في القاذف التي اقترحها *(Keenan & Neumann, 1942)* إلى ظهور ديناميك السوائل الحاسوبي. تم إجراء تطوير الشكل الهندسي للقاذف البخاري تجريبياً وحاسوبياً من أجل مختلف التصاميم وهي القواذف ذات المزج بثبات الضغط *(CPM)*، والقواذف ذات المزج بثبات مقطع الجريان *(CAM)*. بالاضافة إلى التصميم الذي اقترحه (*Eames, 2002*) لاحقاً وهو القاذف ذي معدل تغير ثابت لكمية الحركة *(CRMC)*.

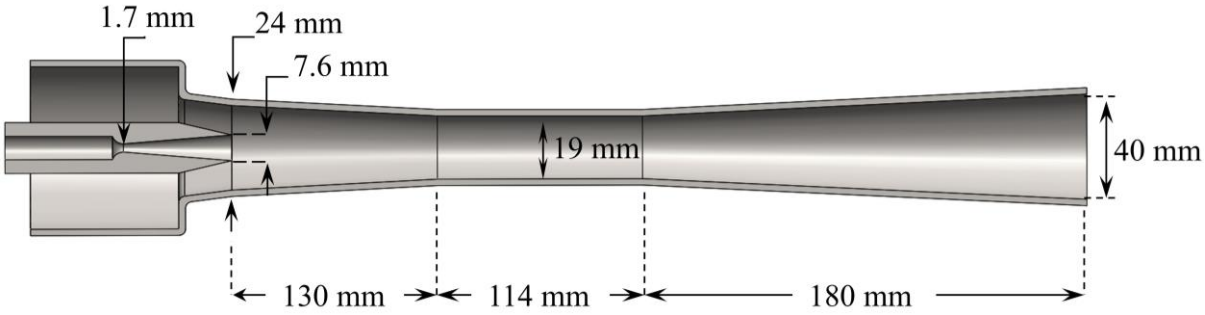
يهدف تطوير الشكل الهندسي لحجرة المزج في هذه الدراسة إلى زيادة قيمة التدفق الأعظمي للتيار الثانوي المخنوق من خلال تكبير مجرى السحب للتيار الثانوي في حجرة المزج وبالتالي زيادة مساحة مقطع المنطقة الفعالة. تم اقتراح الشكل المنحني لجدار حجرة المزج بدلاً من حجرة المزج ذات الجدران المستقيمة المتقاربة حيث يتكوّن الشكل المقترح من قوس يتحدد بنصف القطر *(r)* كما هو مبين في الشكل(5–1). يُلاحَظ من الشكل أن نقطة البداية والنهاية لحجرة المزج مشتركة بين التصميم التقليدي والتصميم المقترح. إنّ ازدياد قيم أنصاف الأقطار يجعل القوس أكثر انحناءً مما يؤدي إلى توسيع مجرى التيار الثانوي تدريجياً، في حين تبقى جميع الأبعاد الأخرى للقاذف كما هي في التصميم التقليدي.



الشكل(5–1): حجرة المزج المنحنية

تم اتخاذ القاذف المدروس تجريبياً من قِبل (*Ruangtrakoon et al., 2011*) من أجل دراسة وتقييم كفاءة حجرة المزج المنحنية حيث يبين الشكل(5–2) أبعاده. يجب أولاً مطابقة نتائج النموذج الحاسوبي مع النتائج التجريبية للتأكد من صحة النموذج الحاسوبي ومن ثم التحقق من التصاميم المقترحة حيث يبين الجدول(5–1)

أنصاف أقطار حجرات المزج المنحنية مرتبة بشكل تصاعدي. تشير الأرقام بعد *"Mix"* إلى الاحداثيات الديكارتية *x-y* [mm] لأعلى نقطة في القوس كما يبين في الشكل(5−1).



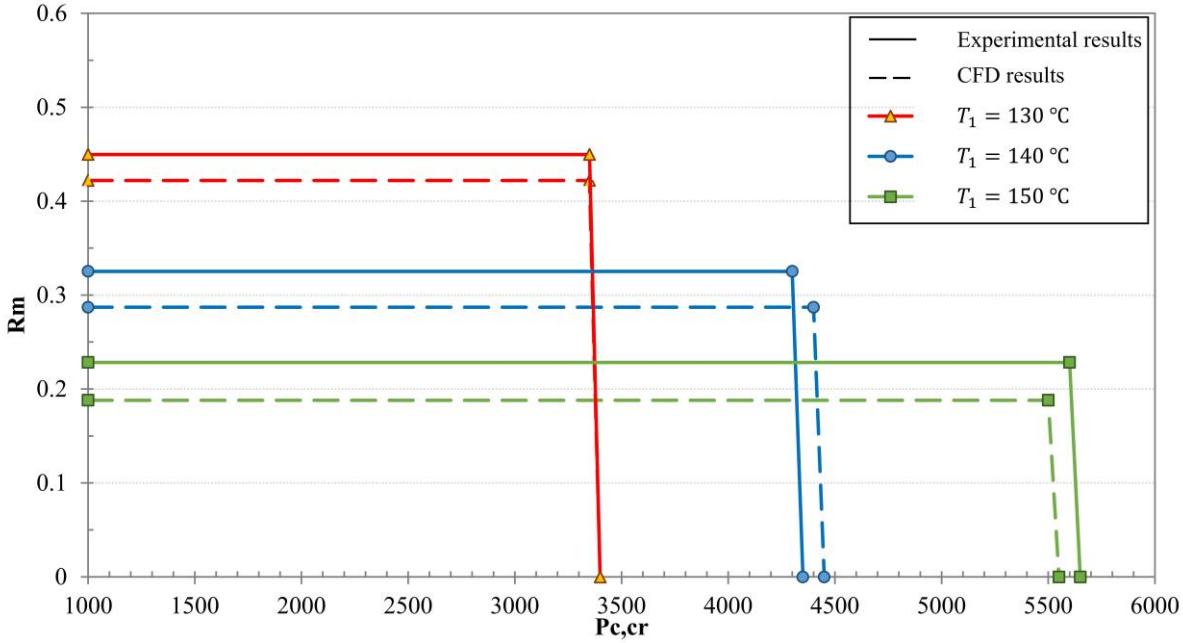
الشكل(5−2): أبعاد القاذف المدروس تجريبياً حسب (*Ruangtrakoon et al., 2011*)

الجدول(5−1): ترميز حجرة المزج المنحنية

رقم القاذف	رمز القاذف *Mix(x-y)*	r [mm]	رقم القاذف	رمز القاذف *Mix(x-y)*	r [mm]
1	Mix 100-3	622.25	6	Mix 80-3	983.09
2	Mix 80-4	660.56	7	Mix 100-2	1070.82
3	Mix 60-4	792.98	8	Mix 60-3	1271.21
4	Mix 40-4	794.70	9	Mix 80-2.5	1320.79
5	Mix 60-3.5	928.61	10	Mix 40-3	1420.76

5−1 مطابقة نتائج النموذج الحاسوبي مع النتائج التجريبية *Numerical model validation*

للتحقق من صحة النموذج تمت مقارنة نتائج المحاكاة الحاسوبية لكل من نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج للقاذف التقليدي مع النتائج التجريبية التي حصل عليها *Ruangtrakoon et al. (2011)* كما هو موضّح في الشكل (5−3). يُلاحظ أن نسبة السحب الكتلي العددية أقل منها في النتائج التجريبية في جميع الحالات بمتوسط خطأ يبلغ 13.7% والخطأ النسبي لضغط التكاثف الحرج حوالي 4%. يمكن أن تُسبب بعض الاختلافات في خصائص السائل المعتمدة في البرنامج الحاسوبي عن خصائص السائل الحقيقي هذه الانحرافات في النتائج. تؤكد هذه النتائج على وثوقية النموذج الحاسوبي في التنبؤ بالنتائج لكل من نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج وتحليل حقل الجريان داخل القاذف.



الشكل(5–3): مقارنة النتائج الحاسوبية مع النتائج التجريبية

5–2 المنحني المميز للقواذف المقترحة *Performance curve of proposed ejectors*

وَرَدَ في الفصل الأول أن المنحني المميز للقاذف يوضّح العلاقة بين نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف، حيث يعمل القاذف في وضع الجريان المخنوق عندما يكون ضغط التكاثف أقل من القيمة الحرجة وعندها يتم تدفق أكبر قدر ممكن من التيار الثانوي عند شروط محددة ومع ارتفاع ضغط التكاثف فوق هذه القيمة تنخفض نسبة السحب الكتلي بشكل كبير بسبب عدم اختناق التيار الثانوي. ينعكس الجريان من المكثف إلى المبخر عندما يصبح ضغط التكاثف أكبر من نقطة الانهيار. يبين الجدول(5–2) النتائج الحاسوبية لنسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج للقواذف المقترحة الجديدة بالمقارنة مع القاذف التقليدي.

الجدول(5–2): نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج للقواذف المقترحة

	T_1 [°C]	130		140		150		160		170	
		R_m	$P_{c,cr}$ [Pa]	R_m	$P_{c,cr}$ [Pa]	R_m	$P_{c,cr}$ [Pa]	R_m	$P_{c,cr}$ [Pa]	R_m	$P_{c,cr}$ [Pa]
القاذف التقليدي		0.45	3350	0.33	4300	0.23	5600	0.16	7200	0.12	8900
1	Mix100-3	-		-		-		-		0.16	8000
2	Mix80-4	-		-		-		-		0.16	8200
3	Mix60-4	-		-		0.24	4100	0.21	6700	0.15	8600
4	Mix40-4	-		-		0.24	4400	0.21	6700	0.15	8600
5	Mix60-3.5	-		0.34	3500	0.27	4800	0.20	6800	0.14	8500
6	Mix80-3	0.25	2250	0.35	3350	0.28	4800	0.20	6800	0.14	8900
7	Mix100-2	-		-		-		-		-	
8	Mix60-3	0.476	2700	0.37	3900	0.27	5300	0.19	7000	0.14	8700
9	Mix80-2.5	-		-		-		-		-	
10	Mix40-3	0.482	2800	0.37	3900	0.27	5300	0.19	7100	0.14	8700

تكشف النتائج الحاسوبية أن القاذفين *Mix80-2.5* و *Mix100-2* يعملان في وضع الجريان المعكوس بسبب ضعف قدرتهما على تحمل ضغوط التكاثف وبالتالي فإن هذين القاذفين لا يعملان تحت شروط التشغيل المدروسة للمرجل.

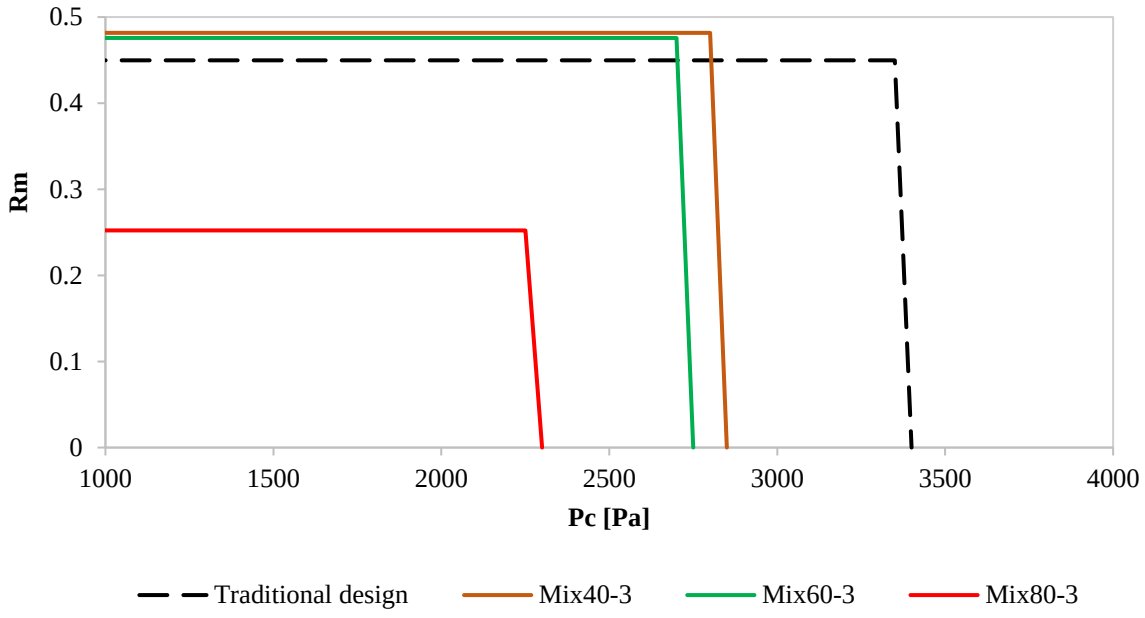
يعمل القاذف *Mix80-3* في وضع ما قبل الاختناق *sub-choked* حسب تصنيف (*Han et al., 2020*) عند درجة حرارة المرجل 130 ℃ وفي وضع الاختناق الملائم *fit-choked* عند [℃] 140، حيث تصل نسبة السحب الكتلي إلى قيمتها العظمى. ينتقل القاذف إلى وضع الاختناق الفائق *super-choked* مع ارتفاع درجة حرارة المرجل، وتنخفض نسبة السحب الكتلي. تعمل باقي التصاميم المقترحة في وضعي الاختناق الملائم والاختناق الفائق ضمن مجالات مختلفة لدرجات حرارة المرجل كما هو موضح في الجدول(5−3).

الجدول(5−3): مجالات عمل القواذف المقترحة حسب شروط تشغيل المرجل

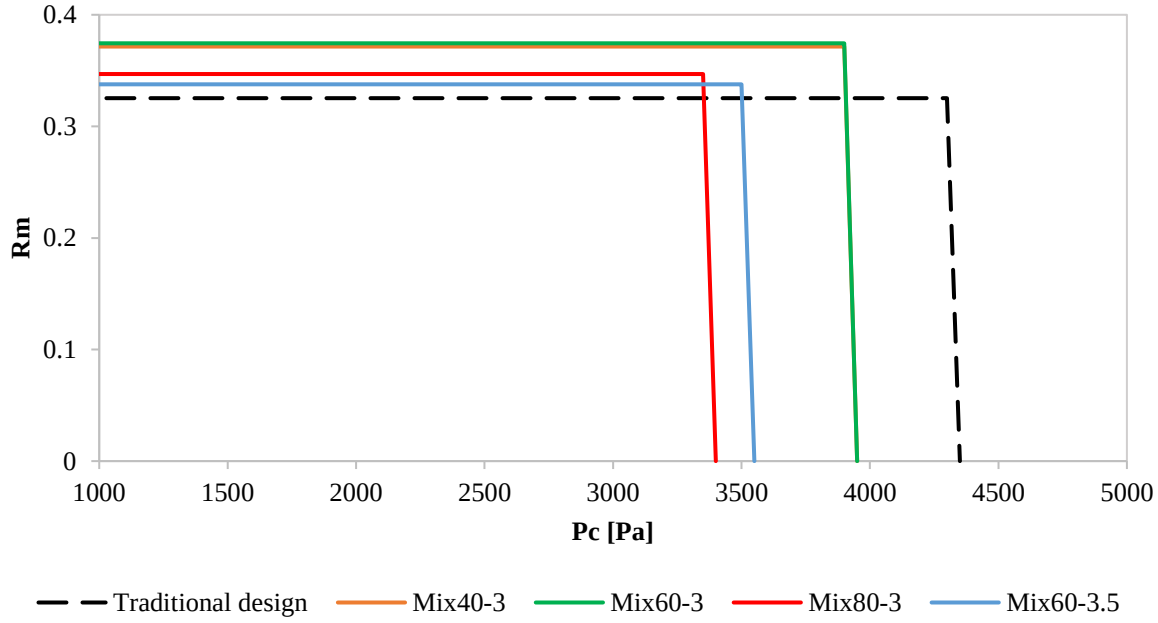
رقم القاذف	رمز القاذف	T_1 130 ℃	140 ℃	150 ℃	160 ℃	170 ℃
القاذف التقليدي		اختناق ملائم	اختناق فائق			
1	*Mix100-3*	جريان معكوس				اختناق ملائم
2	*Mix80-4*	جريان معكوس				اختناق ملائم
3	*Mix60-4*	جريان معكوس		اختناق ملائم	اختناق فائق	
4	*Mix40-4*	جريان معكوس		اختناق ملائم	اختناق فائق	
5	*Mix60-3.5*	جريان معكوس	اختناق ملائم	اختناق فائق		
6	*Mix80-3*	جريان غير مخنوق	اختناق ملائم	اختناق فائق		
7	*Mix100-2*	جريان معكوس				
8	*Mix60-3*		اختناق فائق			
9	*Mix80-2.5*	جريان معكوس				
10	*Mix40-3*	اختناق ملائم	اختناق فائق			

تم رسم منحنيات الأداء للقواذف المقترحة ذات حجرات المزج المنحنية ومقارنتها بالمنحني المميز للقاذف التقليدي عند درجة حرارة تبخر 7.5 ℃ وشروط تشغيل المرجل 130~170 ℃، كما هو موضح من الشكل(5−4) إلى الشكل(5−8) . عند درجة حرارة المرجل 130 ℃، يتم تسجيل أقصى نسبة سحب كتلي تبلغ 0.481 للقاذف *Mix40-3* مقارنةً بـــ 0.449 للقاذف التقليدي كما هو موضح في الشكل(5−4). يتمتع التصميم الأمثل عند درجة الحرارة هذه بضـــغط خلفي حرج يبلغ $[Pa]$ 2800، وهو ما يتوافق مع درجة حرارة تكاثف 23 ℃ حيث تُعتبر منخفضة وغير عملية للتطبيقات على ارض الواقع. كما يتضح من الشكل ذاته أن نسبة السحب الكتلي للقاذف *Mix80-3* أقل منها للقاذف التقليدي حيث تبلغ 0.25، ويعود ذلك بسبب عمل القاذف في وضع ما قبل الاختناق *sub-choked*. تم تسجيل أكبر نسبة سحب كتلي للقاذف *Mix60-3* عند درجة حرارة المرجل 140 ℃ وهي 0.374، مع ضغط تكاثف حرج $[Pa]$ 3900، كما هو موضح في الشكل(5−5). تم رسم منحنيات الأداء للقواذف المدروسة عند درجات حرارة مرتفعة للمرجل من الشكل(5−6) إلى الشكل(5−8). يُلاحظ أنه مع ارتفاع درجة حرارة المرجل تنضـــم قواذف إضـــافية للعمل. عند درجة حرارة المرجل 150 ℃ ، يحقق

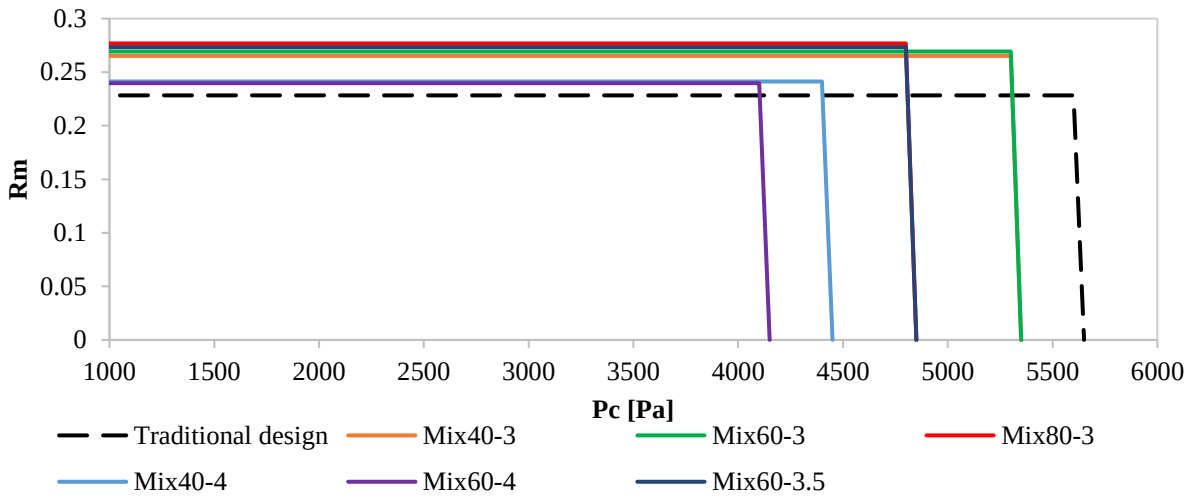
القاذف *Mix80-3* أفضل أداء بنسبة سحب كتلي تبلغ 0.276. وعند 160 ℃ و170 ℃ ، يصل القاذفان *Mix60-4* و *Mix100-3* إلى نسب سحب كتلي عظمى تبلغ 0.208 و0.16 على التتالي. يوضح الشكل(5-6) والشكل(5-7) أن ضغوط التكاثف الحرجة للقواذف المقترحة تقترب من الضغط الحرج للتصميم التقليدي، حيث تزداد بشكل كبير إلى حوالي $[Pa]$ 7000 عند 160 ℃ وأكبر من $[Pa]$ 8000 عند 170 ℃، وهو ما يتوافق مع درجات حرارة التكاثف 39 ℃ و 41.5 ℃ على التتالي وهذه القيم قابلة للتطبيق عملياً.



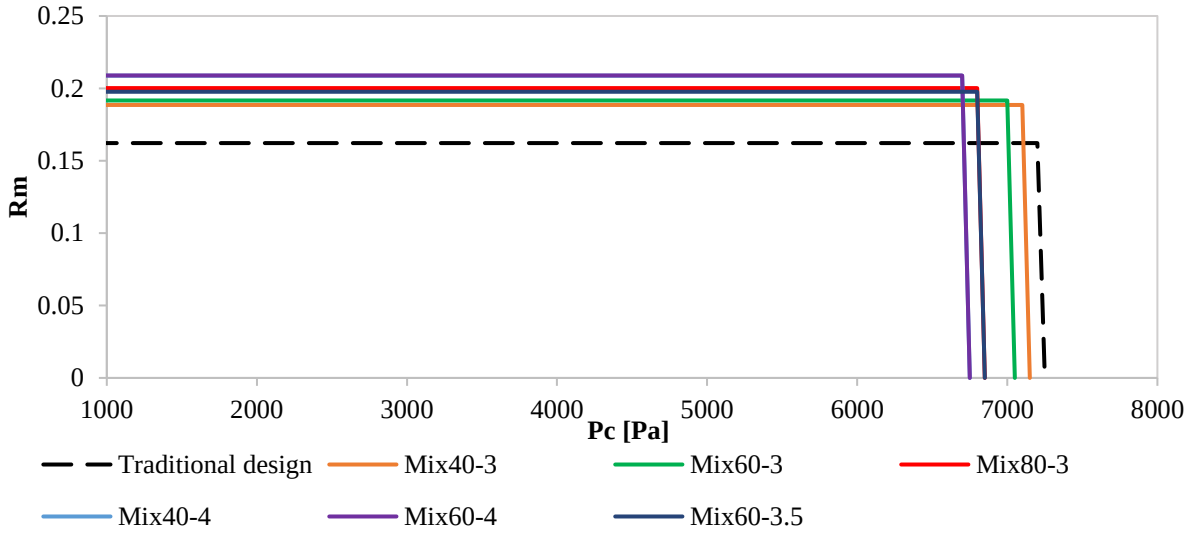
الشكل(5-4): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل 130 ℃



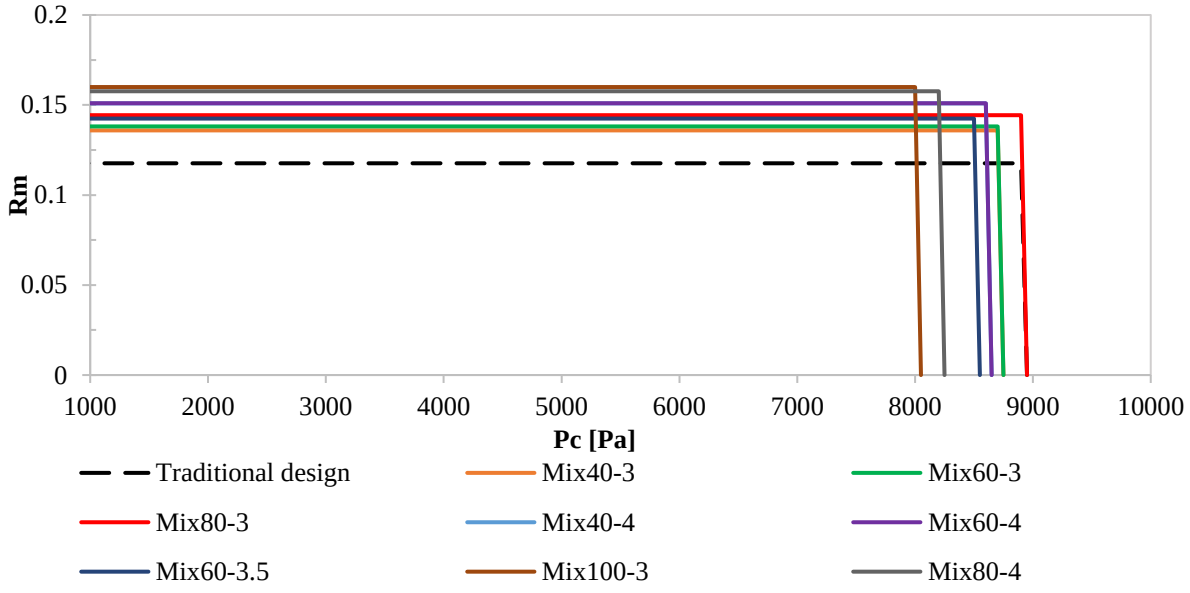
الشكل(5-5): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل 140 ℃



الشكل(5–6): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل 150 °C



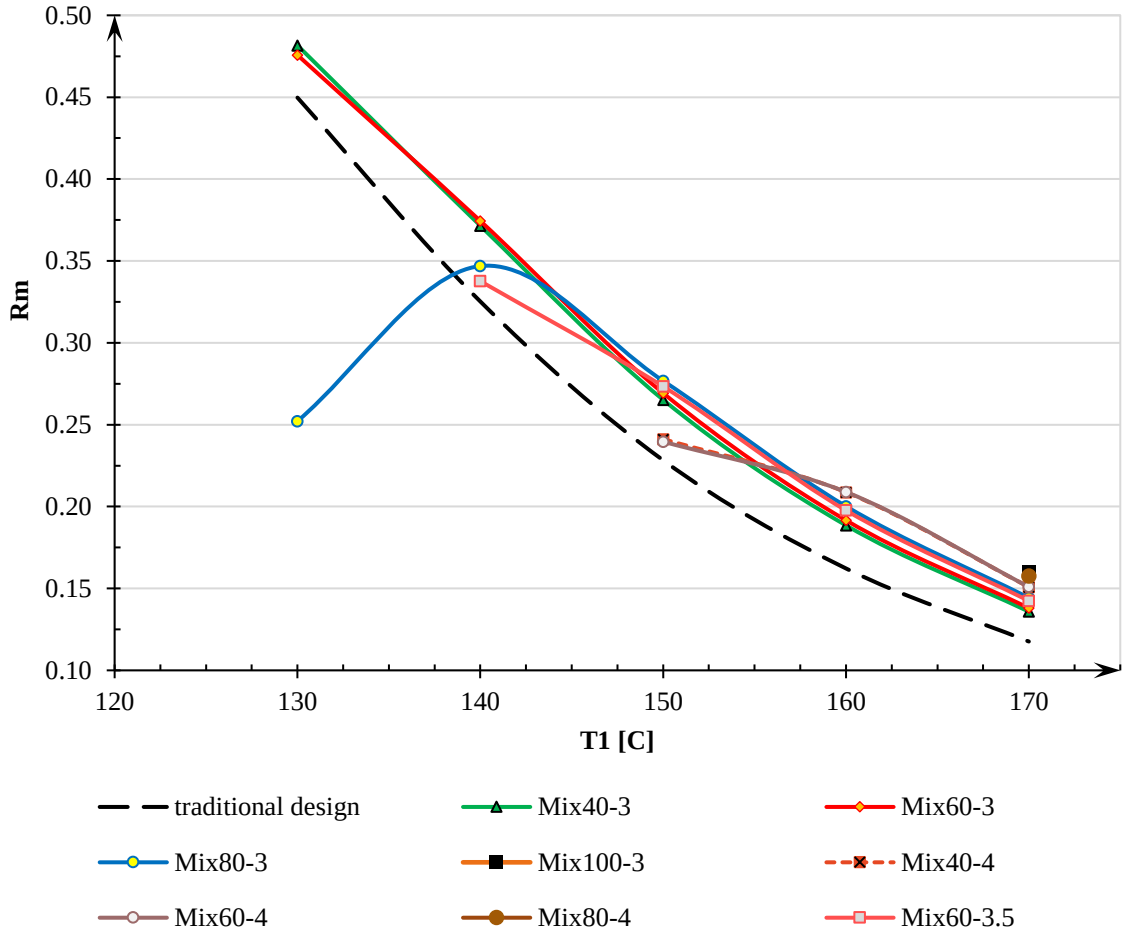
الشكل(5–7): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل 160 °C



الشكل(5–8): منحنيات الأداء عند درجة حرارة المرجل 170 °C

3-5 تقييم الأداء للتصاميم المقترحة *Performance evaluation of proposed designs*

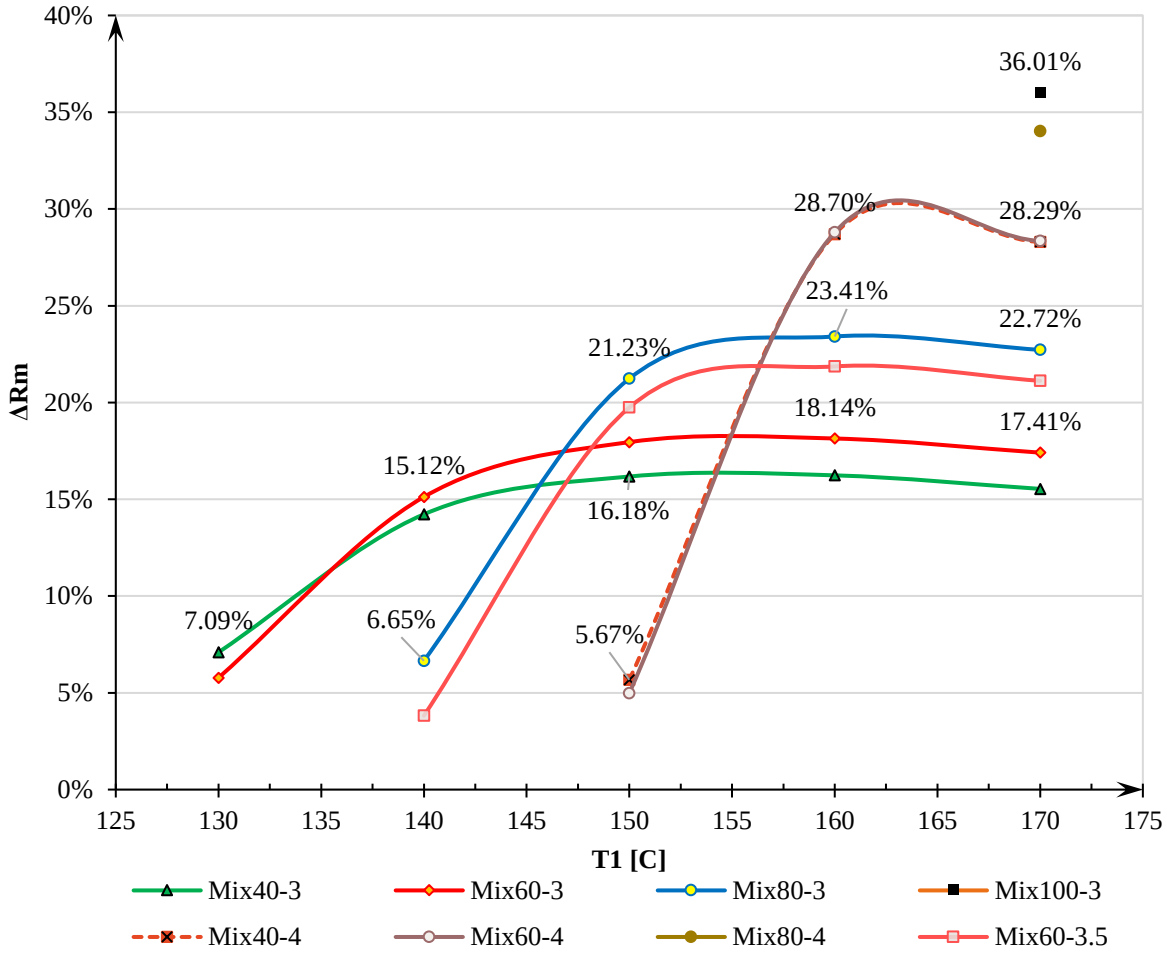
تكشف قيم نسبة السحب الكتلي للتصاميم المقترحة أنّ حجرة المزج المنحنية فعّالة إذ تزداد نسب السحب الكتلي بنسب متفاوتة مقارنةً بالقاذف التقليدي كما هو موضح في الشكل(5-9). تكون نسبة السحب الكتلي مرتفعة عند درجات حرارة مرجل منخفضة في جميع التصاميم المقترحة وتتناقص تدريجياً مع تزايد درجة الحرارة وفي الوقت ذاته يزداد ضغط التكاثف الحرج، يتفق ذلك مع سلوك القاذف التقليدي.



الشكل(5-9): علاقة نسبة السحب الكتلي للتصاميم المقترحة بدرجة حرارة المرجل

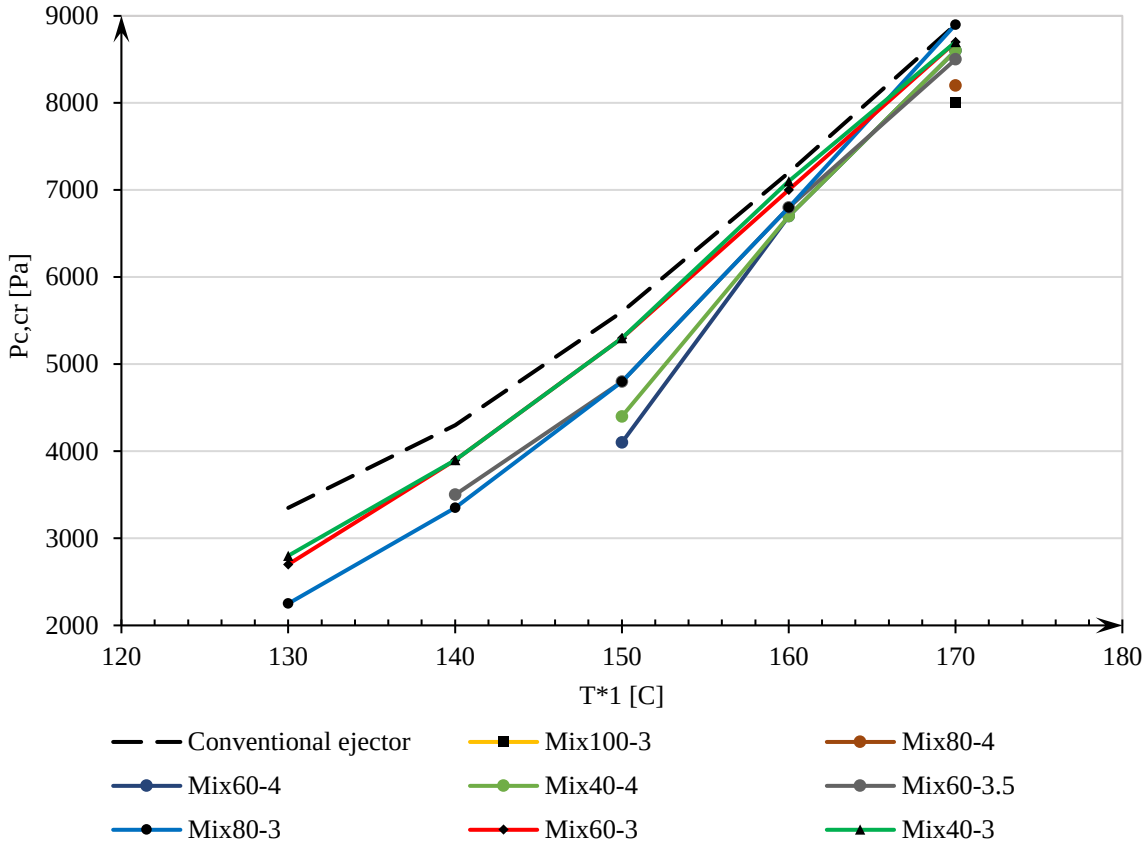
يتضح من الشكل(5-9) إلى أن نسبة السحب الكتلي للقواذف المقترحة ذات حجرات المزج المنحنية أكبر منها في التصميم التقليدي بنسب ربح مختلفة تبعاً لدرجة حرارة المرجل والذي يوضحها الشكل(5-10) إذ يوجد تصميم محدد يحقق نسبة سحب كتلي عظمى لكل درجة حرارة. يُلاحظ وجود زيادة تدريجية في ربح نسبة السحب الكتلي ΔR_m *entrainment gain* في جميع القواذف المقترحة عند درجات حرارة مرجل منخفضة حتى يصل إلى قيمة ثابتة تقريباً عند درجات حرارة أعلى. يتراوح الربح في نسبة السحب الكتلي 6%~17% تقريباً من أجل القاذف *Mix60-3* و 7%~15% من أجل القاذف *Mix40-3* على كامل مجال شروط تشغيل المرجل المدروس. يحقق القاذفان *Mix60-3.5* و*Mix80-3* ربحاً متزايداً بدءاً من درجة حرارة 140 °C إلى أن يصل إلى

21% عند درجة حرارة 150 °C، ويبقى الربح ثابتاً تقريباً إلى أن تصل درجة حرارة المرجل إلى 170 °C. يبين الشكل أنّ ربح القاذفان *Mix40-4* و*Mix60-4* متطابقان ويحققان قيمة عظمى مقدارها 28% عند درجات حرارة مرجل 160 °C و 170 °C. يحقق القاذفان *Mix100-3* و *Mix80-4* ربحاً مقداره 36% و 34% على التتالي عند درجة حرارة مرجل 170 °C.



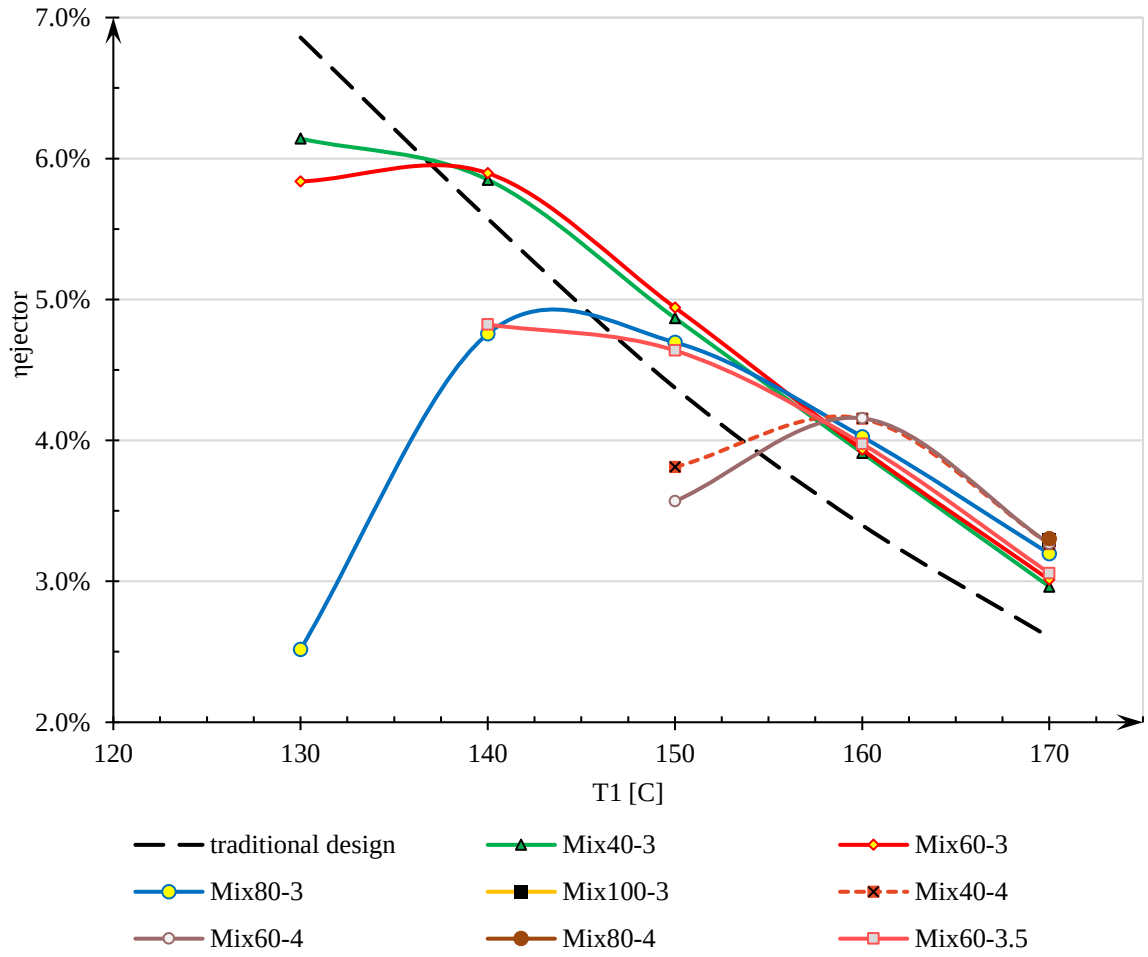
الشكل(5–10): علاقة الربح في نسبة السحب الكتلي بدرجة حرارة المرجل

من الجدير بالذكر أن ضغط التكاثف الحرج ينخفض في التصاميم المقترحة بالمقارنة مع نظيره في القاذف التقليدي وخاصّة من أجل درجة حرارة المرجل أقل من 160 °C كما يبين الشكل(5–11).



الشكل(5–11): علاقة ضغط التكاثف الحرج بدرجة حرارة المرجل

لتقييم الأداء بشكل شامل حيث يتضمن كل من نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج والذي يتم التعبير عنه في العلاقة(1.5) تم رسم منحنيات المردود المحسوبة على أساس ضغط التكاثف الحرج في الشكل(5–12). توضح هذه المنحنيات أن منحني المردود للتصميم التقليدي يبدأ أعظمياً عند درجة حرارة 130 ℃ وينخفض مع ارتفاع درجة حرارة المرجل. عند درجة حرارة المرجل 140 ℃، يبدي القاذفان *Mix40-3* و *Mix60-3* مردود أعلى من التصميم التقليدي. تزداد التصاميم التي تبدي مردوداً أعلى من القاذف التقليدي عند درجة حرارة المرجل 150 ℃ وتحديداً القاذفان *Mix80-3* و*Mix60-3.5*. تُظهر جميع القواذف المقترحة مردوداً أعلى من التصميم التقليدي عند درجات حرارة المرجل 160 ℃ و 170 ℃.

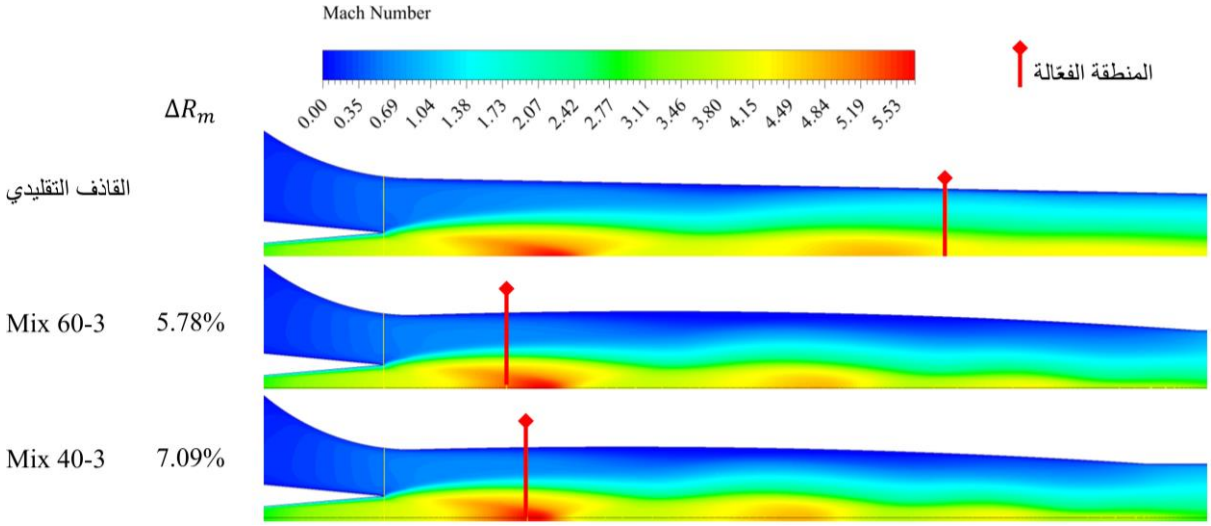


الشكل(5–12): علاقة المردود للتصاميم المقترحة بدرجة حرارة المرجل

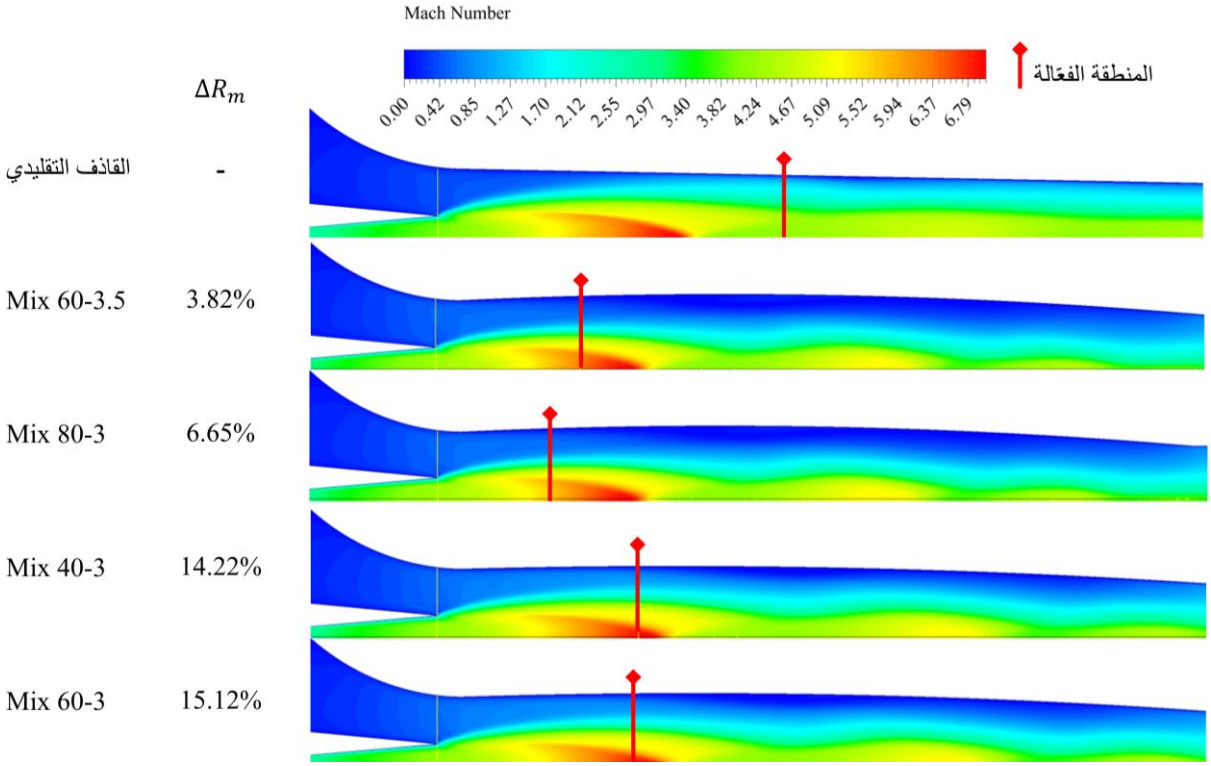
5–4 التفسير الفيزيائي لتحسين الأداء في التصاميم المقترحة من خلال تحليل حقل الجريان

إنّ إحدى أهم ميزات المحاكاة الحاسوبية هي تحليل حقل الجريان داخل القاذف البخاري مما يوفر رؤى حول الأداء الذي تقدّمه التصاميم الجديدة المقترحة لحجرة المزج المنحنية. توضّح الأشكال من الشكل(5–13) إلى الشكل(5–17) تدرّجات اللون لعدد ماخ من أجل درجات حرارة مختلفة للمرجل وكذلك تبيّن مواضع اختناق التيار الثانوي والتي تحدث في المقطع حيث يكون الضغط الستاتيكي عند الجدار أصغرياً *(Chunnanond & Aphornratana, 2004a; Han et al., 2020)*. تم ترتيب القواذف مع تزايد الربح في نسبة السحب الكتلي ΔR_m . يُلاحظ من الأشكال أنّ المنطقة الفعّالة تنزاح نحو مخرج الفوهة في معظم التصاميم المقترحة ويكون عندها عدد ماخ للتيار الأولي أعظمياً، ما عدا القاذفان *Mix60-3.5* و*Mix80-3* حيث تنزاح المنطقة الفعالة بعيداً عن مخرج الفوهة عند درجة حرارة المرجل 170 °C كما هو موضح في الشكل(5–17) وتبقى ثابتة دون تغيير في القواذف *Mix40-3* و *Mix60-3* و *Mix60-3.5* و *Mix80-3* عند درجة حرارة 160 °C كما هو موضح في الشكل(5–16).

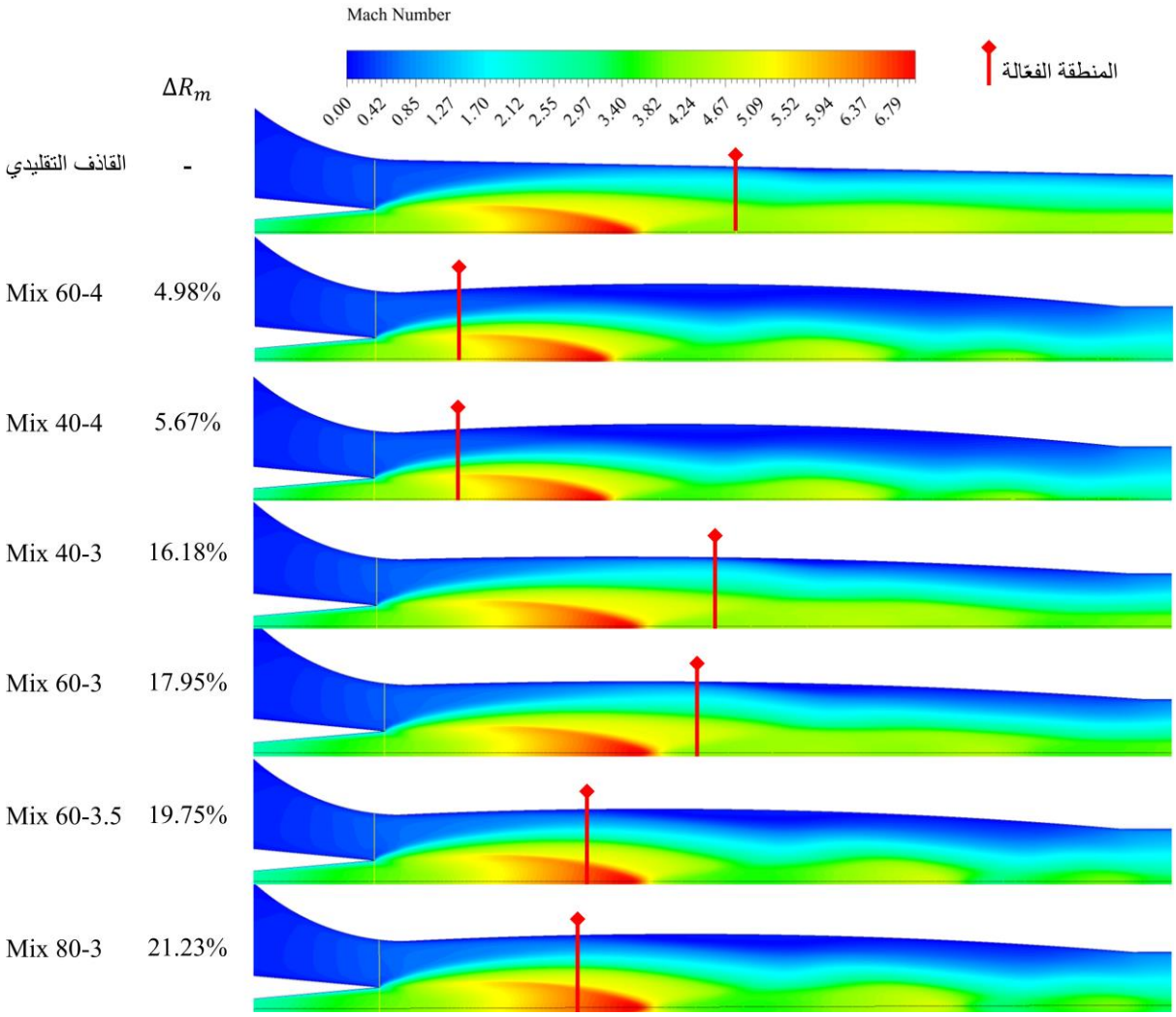
يتغير شكل نواة التيار الأولي في حجرات المزج المنحنية عند كل درجة حرارة للمرجل والتي تؤثر بشكل جوهري على أداء القاذف. ونتيجة لذلك، يأخذ مجرى التيار الثانوي شكلاً جديداً يختلف عن المجرى المتقارب الموجود في التصميم التقليدي لحجرة المزج ذات الجدران المستقيمة. إن انزياح المنطقة الفعّالة وتغيّر شكل نواة التيار الأولي هما تَبِعات مباشرة للتصميم الجديد المقترح لحجرة المزج، تؤدي هذه التبعات الايجابية إلى زيادة المساحة الفعالة مما يسمح بزيادة التدفق الأعظمي للتيار الثانوي وبالتالي زيادة نسبة السحب الكتلي. ولكن لابد من تحديد قيم السرعة والكثافة للتيار الثانوي في المنطقة الفعالة بعد انزياحها في التصميم الجديد وهذا ما توضحه الفقرة التالية في دراسة أحد التصاميم المقترحة.



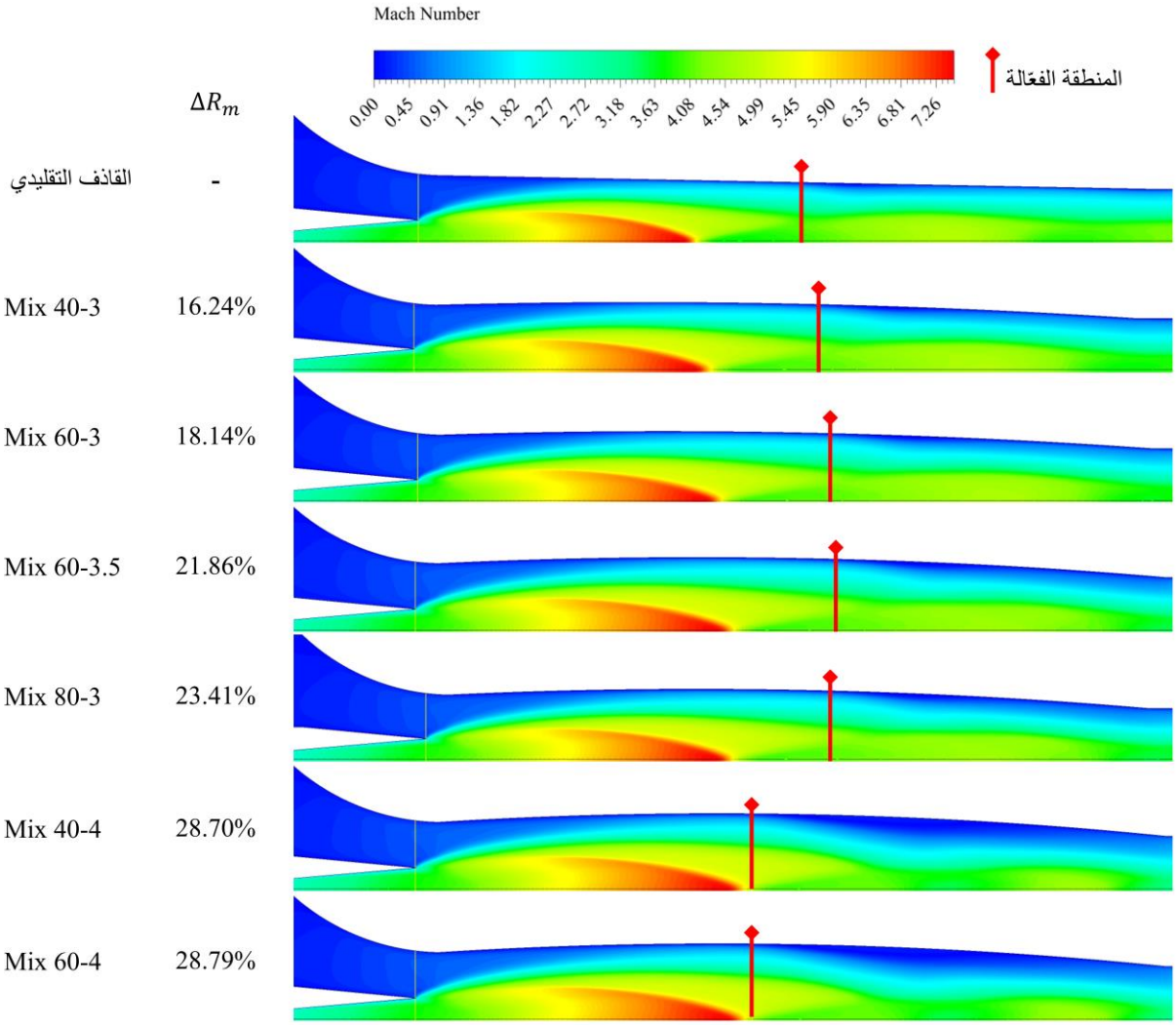
الشكل(5-13): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل 130 ℃



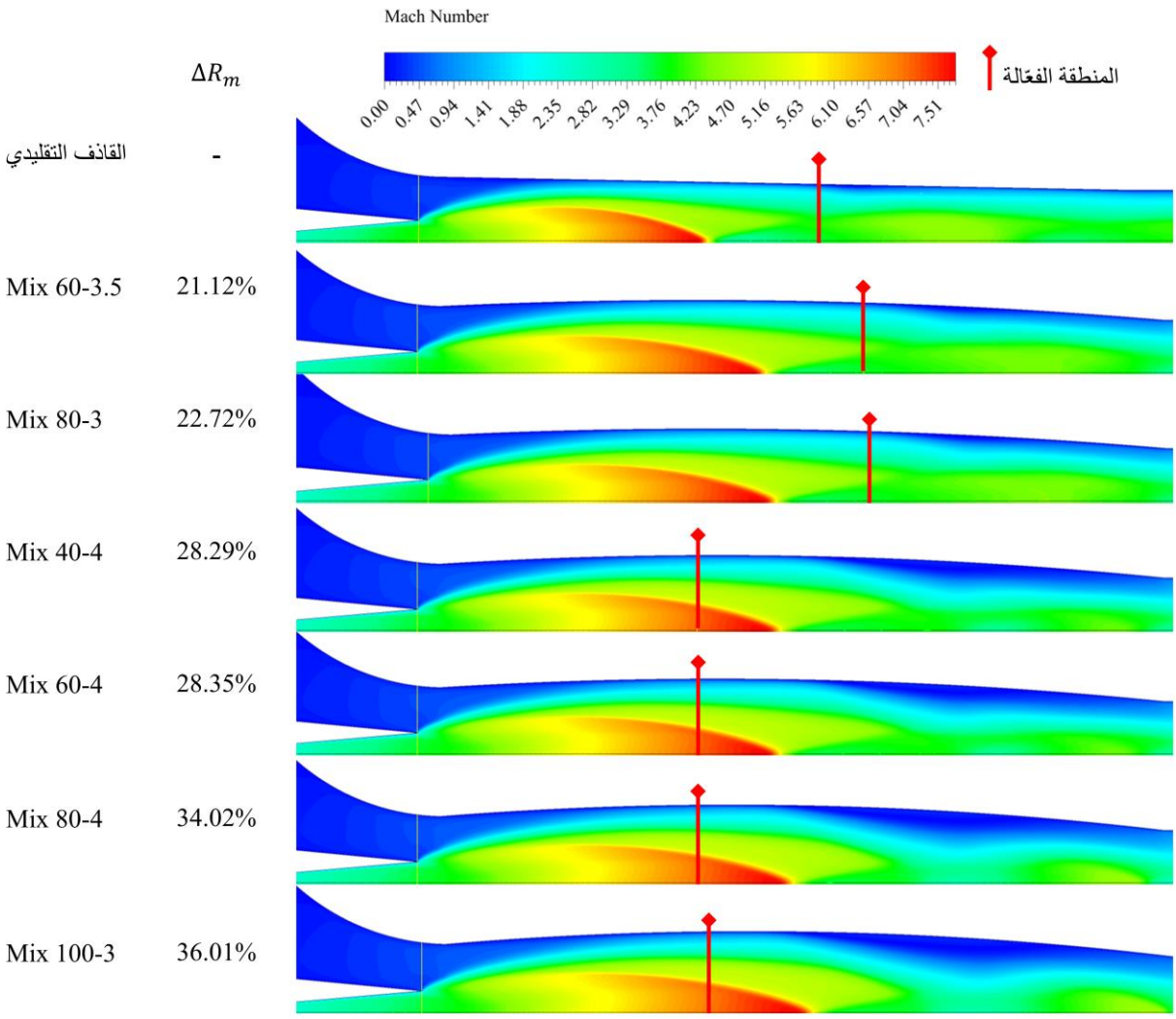
الشكل(5-14): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل 140 ℃



الشكل(5–15): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل 150 ℃



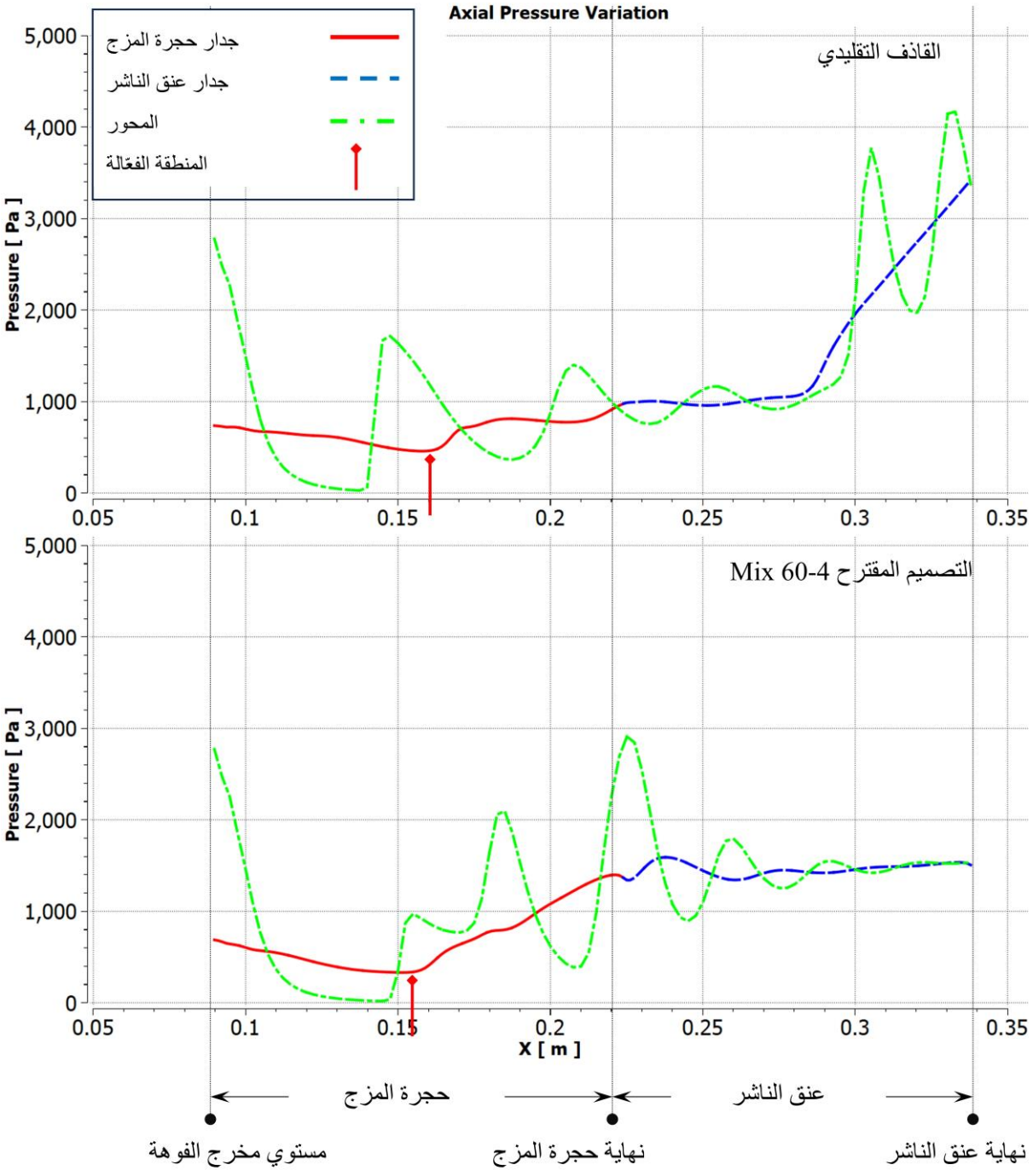
الشكل(5–16): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل 160 ℃



الشكل(5−17): التدرّج اللوني لعدد ماخ من أجل درجة حرارة المرجل 170 ℃

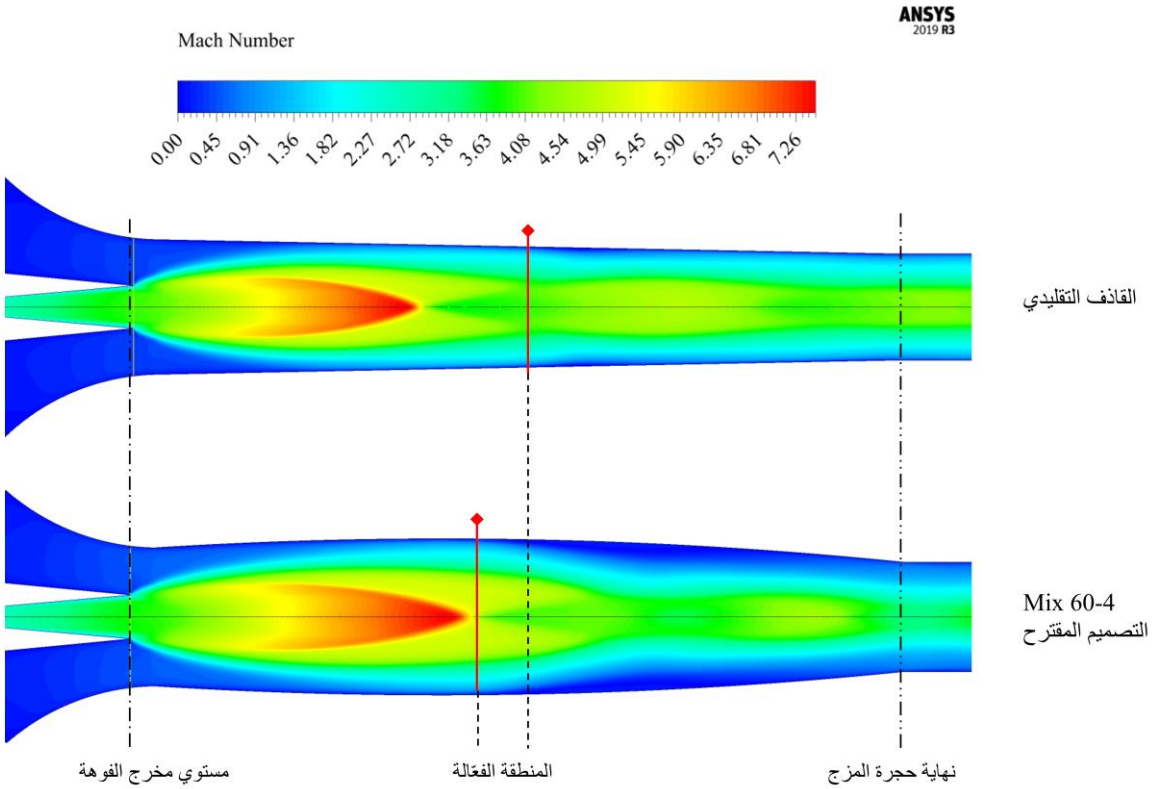
5−4−1 تقييم الأداء في القاذف المقترح *Mix60-4*

تحلل هذه الفِقرة حقل الجريان للقاذف *Mix60-4* الذي يحقق أفضل أداء عند درجة حرارة المرجل 160 ℃ بربح لنسبة السحب الكتلي مقداره $\Delta R_m = 28.8\%$ وبمردود $\eta = 4.16\%$ بالمقارنة مع التصميم التقليدي. يوضح الشكل(5−18) توزع الضغط الستاتيكي على طول حجرة المزج عند الجدار وعند محور القاذف. تشير نتائج المحاكاة إلى أن موضع المنطقة الفعّالة في القاذف *Mix60-4* ينزاح بمقدار $10\ [mm]$ باتجاه مخرج الفوهة. يتم تحديد هذا الموضع في المكان الذي يصل فيه الضغط الستاتيكي على الجدار إلى قيمة صغرى في حجرة المزج كما ورد في *(Chunnanond & Aphornratana, 2004a; Han et al., 2020)*. يزداد الضغط الستاتيكي تدريجياً في كلا التصميمين مع وجود تذبذبات على طول المحور ناتجة عن حدوث موجات صدمة مائلة.



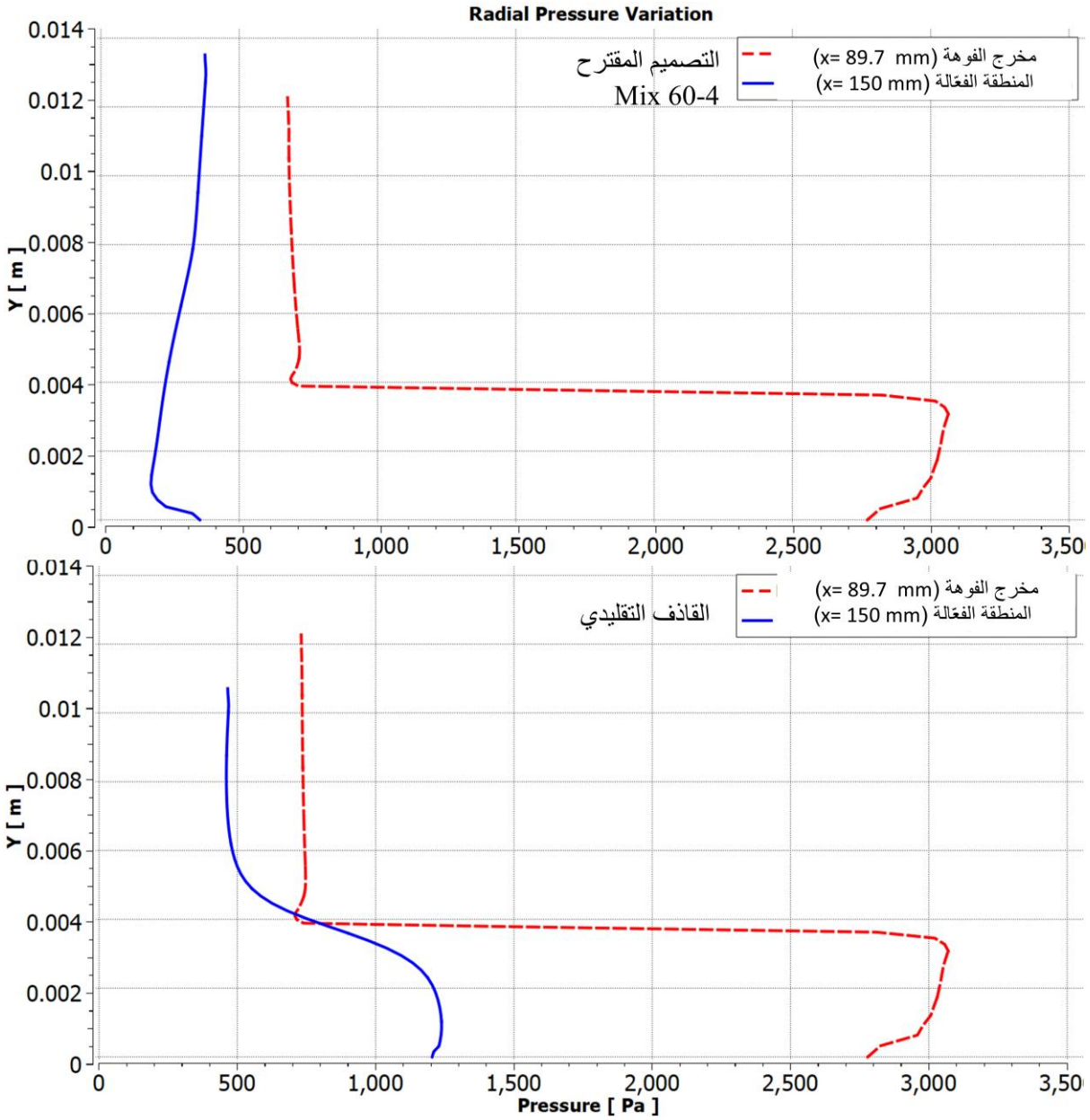
الشكل(5–18): توزع الضغط الستاتيكي في القاذف التقليدي والقاذف المقترح *Mix60-4*

يتدفق التيار الأولي الخارج من الفوهة تحت شروط الضغط الخلفي للفوهة السائد في حجرة المزج وتشكّل الطبقة الحديّة الحرّة خلف الفوهة والتي تسبب بتشكّل موجات تمدد بزاوية محددة. يتم تصنيف هذه الموجات إلى نوعين كما ورد في الفصل الأول: موجات تمدد شديد وموجات تمدد ضعيف. يوضح الشكل(5–19) أن زاوية التمدد لموجات التمدد الضعيف تبقى ذاتها تقريباً في كلا التصميمين، فإن نواة التيار الأولي تشكل شكلاً أكثر تطاولاً على طول المحور في حجرة المزج المنحنية. يؤدي ذلك إلى مجرى سحب أكبر وأطول وبالتالي إلى منطقة فعالة أكبر تسمح بسحب كمية أكبر من التيار الثانوي.

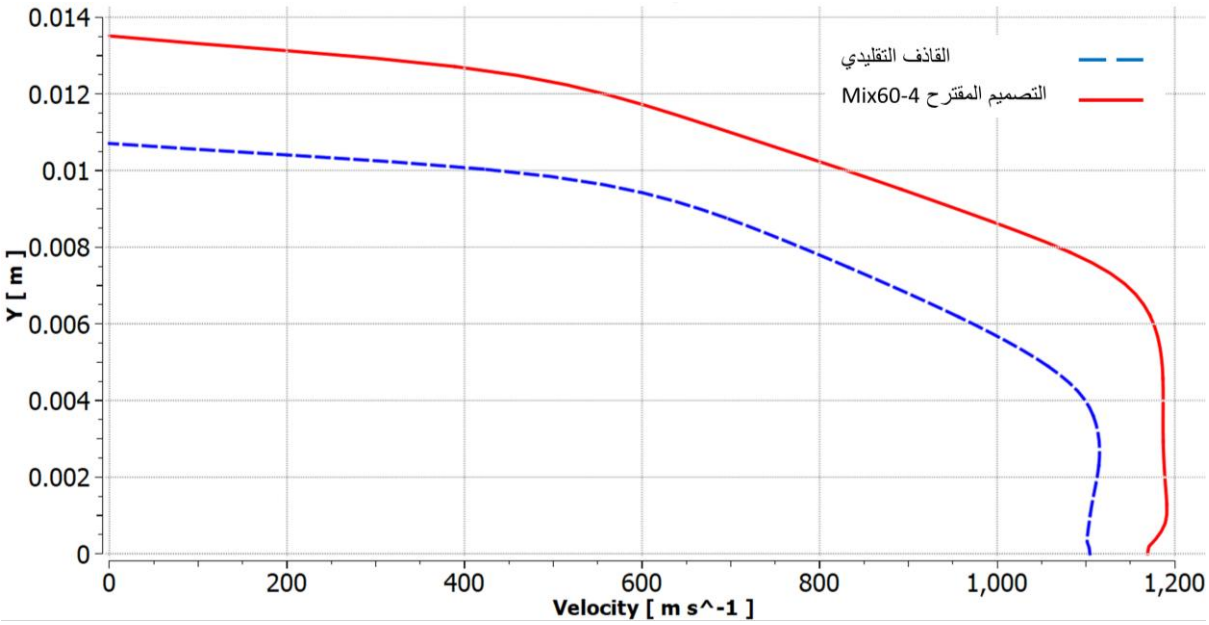


الشكل(5−19): التدرّج اللوني لعدد ماخ للقاذف التقليدي والقاذف المقترح *Mix60-4*

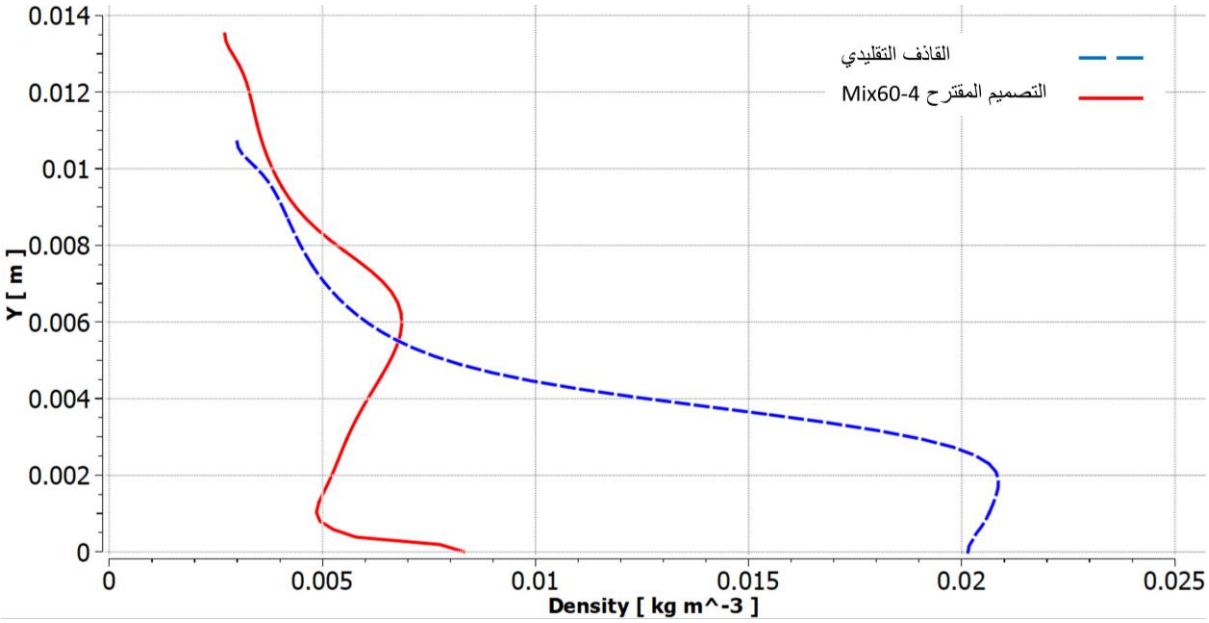
يوضح الشكل(5−20) توزع الضغط قطرياً عند مستوي مخرج الفوهة ومستوي المنطقة الفعّالة في القاذف التقليدي والقاذف المقترح *Mix60-4*. يتضح أنّ بروفايل الضغط متطابق عند مستوي مخرج الفوهة للتصميمين، في حين أن ضغط التيار الثانوي في القاذف المقترح أقل منه في القاذف التقليدي عند مستوى المنطقة الفعالة. يؤدي انخفاض الضغط في المنطقة الفعالة إلى ازدياد السرعة كما هو موضح في الشكل(5−21). تزداد سرعة التيار الثانوي بشكل كبير حيث تصل إلى $[m/s]$ 800 في مستوي المنطقة الفعالة للتصميم المقترح عند نصف قطر $[mm]$ 10 مقارنةً بما هي عليه في التصميم التقليدي حيث كانت قيمتها $[m/s]$ 400، أي أنّ السرعة ازدادت بنسبة 100%. يوضح الشكل(5−22) التوزع القطري للكثافة عند مستوى المنطقة الفعّالة حيث يشير إلى زيادة طفيفة في كثافة التيار الثانوي في القاذف المقترح. يزداد التدفق الكتلي الأعظمي للتيار الثانوي تبعاً لذلك حسب معادلة الاستمرار بينما يبقى التدفق الأولي ثابتاً وبالتالي تحقيق نسبة سحب كتلي أعلى.



الشكل(5–20): التوزّع القطري للضغط في مستوي المنطقة الفعّالة



الشكل(5–21): التوزّع القطري للسرعة في مستوي المنطقة الفعّالة

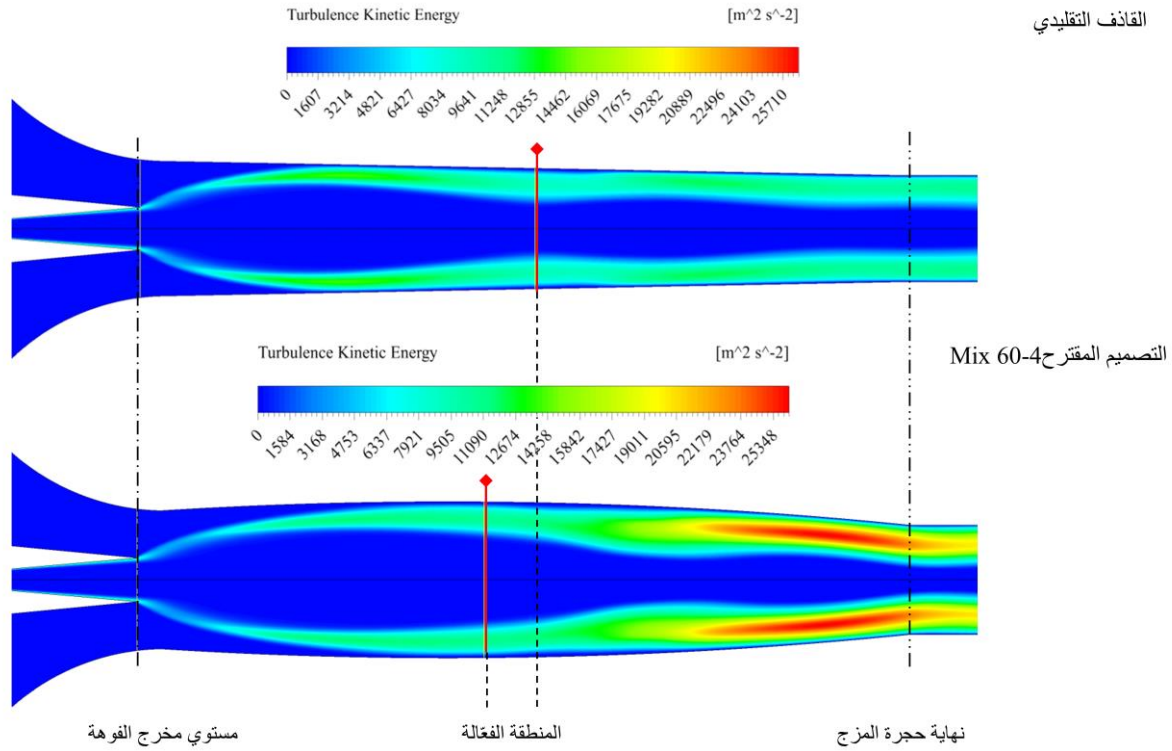


الشكل(5–22): التوزّع القطري للكثافة في مستوي المنطقة الفعّالة

يمكن تفسير ازدياد سرعة التيار الثانوي في القاذف *Mix60-4* عنها في القاذف التقليدي في مستوي المنطقة الفعالة بأنّ معدل انتقال كمية الحركة من التيار الأولي إلى التيار الثانوي ازداد في التصميم الجديد. يمكن تحديد كمية الحركة المنتقلة من خلال مفهوم طاقة الاضطراب الحركية *Turbulence kinetic energy* في مستوي المنطقة الفعّالة.

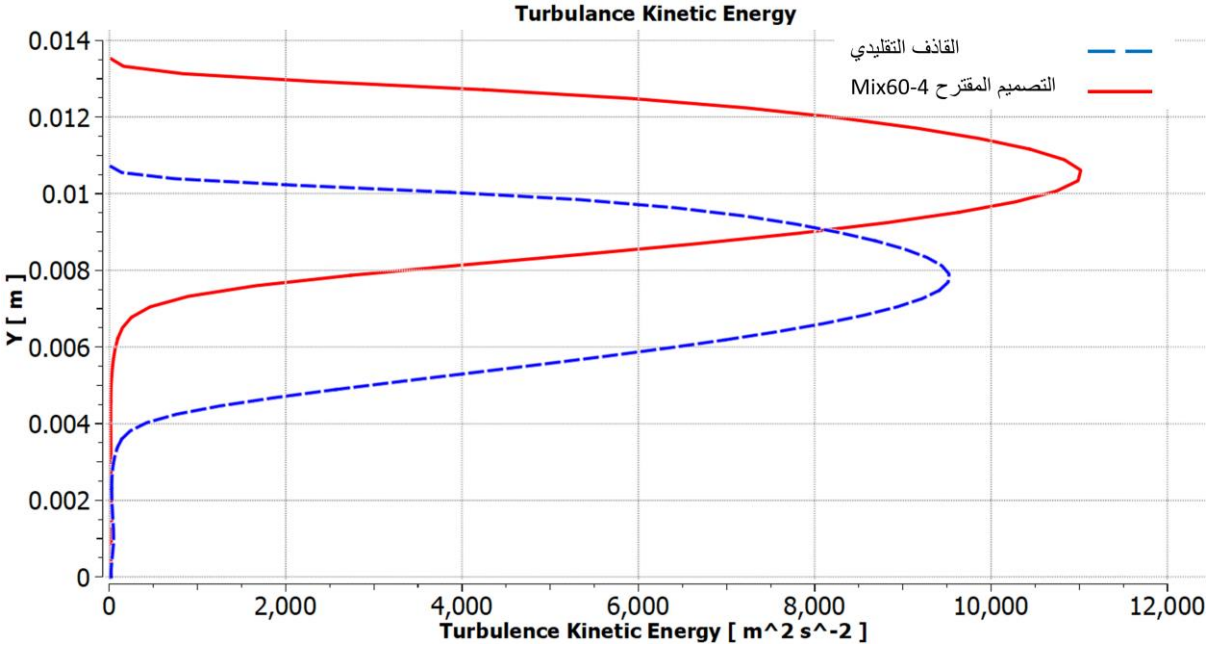
دُرِست الحركة المضطربة في الجريانات من قِبل *Von Karman* و *Taylor* وغيرهم، عرّف (*J. O. Hinze, 1975*) الحركة المضطربة للسوائل بأنها الحالة العشوائية للجريان تتغير فيها البارامترات عشوائياً مع تغير الزمان والمكان. يتكون الاضطراب من كتيلات سائلية ماكروسكوبية تقوم بحركات اهتزازية مع اتجاه الجريان

الرئيسي والاتجاه العرضاني عليه، تدعى هذه الكتيلات بالاعاصير *eddies*. تحرّض الاعاصير حقلاً للسرعة غير مستقر يتحد مع حقل السرعة للجريان الاساسي شبه المستقر وبالتالي يتغير حقل السرعة وحقل الضغط المرتبط به تغيراً عشوائياً. إن الحركة العرضانية الناتجة عن الأعاصير تسبب بنشوء عملية مزج بين جزيئات السائل ترتبط بها عملية انتقال للطاقة الحركية وكمية الحركة بين الجزيئات السريعة والجزيئات البطيئة دون الاخلال بشرط الاستمرار. ينجم عن ذلك كبح للجزيئات السريعة وتسريع للجزيئات البطيئة. يقضي شرط الالتصاق قرب الجدران بأن تنعدم السرعة وتذبذباتها. تمثّل طاقة الاضطراب الحركية متوسط الطاقة الحركية لواحدة الكتلة المرتبطة بالأعاصير في الجريان المضطرب مما يشير إلى شدة الاضطراب. تشير قيم طاقة الاضطراب الحركية الكبيرة إلى اضطراب أقوى تنتج عادةً عن طبقات السوائل المتجاورة التي تتحرك بسرعات ذات تفاوت كبير. تتضمن معادلات نافير–ستوكس المثقّلة لرينولدز *(RANS)* في عمليات النمذجة في ديناميك السوائل الحاسوبي طاقة الاضطراب الحركية ولزوجة الدوامة. يبين الشكل(5–23) تدرّج اللون لطاقة الاضطراب الحركية في كل من التصميم التقليدي والتصميم المقترح لحجرة المزج للقاذف *Mix60-4* عند درجة حرارة المرجل 160 °C، يُلاحظ من توزّع اللون الأحمر في نهاية حجرة المزج المنحنية أن طاقة الاضطراب الحركية تزداد في التصميم المقترح بالمقارنة مع التصميم التقليدي وهذا دليل على أنّ انتقال كمية الحركة من التيار الأولي إلى التيار الثانوي يزداد. يبين الشكل أيضاً أن عملية المزج تكون قليلة في المنطقة قرب مخرج الفوهة حيث تكون طبقة القص رقيقة ثم تزداد سماكتها تدريجياً لتزداد عملية المزج مع تباطؤ التيار الأولي وتسارع التيار الثانوي.



الشكل(5–23): التدرّج اللوني لطاقة الاضطراب الحركية

يبين الشكل(5–24) أن قيمة طاقة الاضطراب الحركية تزداد في مستوي المنطقة الفعالة في القاذف المقترح *Mix60-4* بالمقارنة مع التصميم التقليدي، مما يدل على أن كمية الحركة المنتقلة الى التيار الثانوي أكبر. يكون فرق السرعة بين التيارين كبيراً عند مستوى مخرج الفوهة حيث يتدفق التيار الأولي بكمية حركة أكبر وتتكون طبقة إجهاد القص. تؤخّر هذه الطبقة عملية المزج. يمكن ايجاد توزع البارامترات المختلفة للتصاميم المقترحة الاخرى من أجل شروط التشغيل المختلفة بشكل مشابه.



الشكل(5–24): بروفايل طاقة الاضطراب الحركية في مستوي المنطقة الفعّالة

الفصل السادس

الخاتمة

Conclusion

6-1 خاتمة البحث

عرض البحث طريقة حساب أبعاد القاذف البخاري باستخدام العلاقات الترموديناميكية الناظمة لحقل الجريان ضمن القاذف البخاري باعتبار الجريان ايزوانتروبي وتم اثبات صحة استخدام هذه العلاقات بنسب خطأ مقبولة لنسبة السحب الكتلي. كما يمكن استنتاج أن العلاقات الرياضية المستخدمة موافقة للعلاقات التي يعتمدها برنامج *ANSYS Fluent*. كما تم ايجاد مجال صحّة استخدام العلاقات النظرية لحساب أقطار القاذف حسب قيمة عدد ماخ المطلوب عند مخرج الفوهة.

أثبتت المحاكاة الحاسوبية لحقل الجريان باستخدام ديناميك السوائل الحاسوبي أنها طريقة فعّالة لتحديد التصميم الأمثل قبل تصنيع القاذف الحقيقي. إن تطوير النموذج العددي ضروري للتنبؤ بدقة بأداء القواذف فوق الصوتية. إن الطرق التجريبية تستغرق وقتاً طويلاً بالإضافة إلى التكلفة العالية في حين توفر الطرق الحاسوبية بديلاً فعّالاً لتحليل ظواهر الجريان المعقدة داخل القاذف بما في ذلك توزّع البارامترات المختلفة مثل الضغط والسرعة والكثافة. يتم التحقق أيضاً بتأثير الشكل الهندسي لحجرة المزج على أداء القاذف مع التركيز بشكل خاص على نسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج.

6-2 نتائج البحث

أ- وُجد أن أداء التصميم النظري للقاذف البخاري بالاعتماد على العلاقات الترموديناميكية النظرية ليس أعظمياً حيث يجب تغيير المساحة النسبية لحجرة المزج من أجل الحصول على نسبة سحب كتلي أعظمية، وتم دراسة ثلاث تعديلات تصميمية هندسية لحجرة المزج على التصميم النظري وهي:

- **دراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات مساحة مدخل التيار الثانوي:**

تمت دراسة أداء القاذف في هذه الحالة بتغيير قطر كل من مخرج الفوهة ومدخل الناشر بحيث تبقى مساحة مدخل التيار الثانوي ثابتة. تزداد نسبة السحب الكتلي مع تناقص المساحة النسبية لحجرة المزج وتبلغ قيمة عظمى مقدارها $R_m = 0.491$ من أجل مساحة نسبية $A_{2v}/A_{2s} = 1.9$ بزيادة نسبية 14.7% عن نسبة السحب الكتلي للتصميم النظري. تتراجع المنطقة الفعالة وتقترب من الفوهة مما يزيد من مساحتها ومن التدفق الكتلي الاعظمي للتيار الثانوي حيث تتحول موجات التمدد الى موجات تمدد شديدة.

- **دراسة تأثير مساحة مقطع دخول التيار الثانوي مع ثبات مساحة مخرج الفوهة:**

تمت دراسة أداء القاذف من أجل مساحات مختلفة لمقطع دخول التيار الثانوي وذلك بتثبيت قطر مخرج الفوهة وتغيير قطر مدخل التيار الثانوي. تزداد نسبة السحب الكتلي مع ازدياد المساحة النسبية لحجرة المزج إلى أن تبلغ قيمة عظمى عند $A_{2v}/A_{2s} = 12$ بزيادة نسبية على نسبة السحب الكتلي مقدارها 26.8% عن نسبة السحب الكتلي للتصميم النظري. تكون المنطقة الفعالة قريبة من الفوهة ويؤدي ذلك إلى تكبير مجرى التيار الثانوي وبالتالي زيادة مساحة المقطع الحرج للتيار الثانوي مما يفسّر زيادة نسبة السحب الكتلي.

- **دراسة تأثير مساحة مخرج الفوهة مع ثبات قطر مدخل التيار الثانوي:**

تزداد نسبة السحب الكتلي مع تناقص المساحة النسبية لحجرة المزج حتى تبلغ قيمة عظمى من أجل نسبة المساحة $A_{2v}/A_{2s} = 4.7$ بزيادة نسبية مقدارها 5.1% عن نسبة السحب الكتلي للتصميم النظري.

لذلك تم ايجاد معاملات تصحيح تصميمية لتعديل أقطار القاذف البخاري المصمم نظرياً وذلك من أجل شروط التشغيل المدروسة.

ب– تم اقتراح ودراسة تصميم هندسي جديد لحجرة المزج في القاذف البخاري فوق الصوتي في هذا البحث بهدف تحسين الأداء باستخدام ديناميك السوائل الحاسوبي.

- التصميم المقترح هو حجرة مزج منحنية حيث يكون جدار الحجرة جزء من قطّاع دائري نصف قطره r.
- تم اختبار 10 تصاميم بأنصاف اقطار مختلفة أبدت 8 منها تحسناً في نسبة السحب الكتلي ضمن مجال درجات حرارة مرجل 130 ℃ ~ 170 ℃ .
- يتراوح نصف قطر القوس في التصاميم العشرة المدروسة $[mm]$ 622.25 $[mm]$~1420.76.
- تم التحقق من القيم الحاسوبية لنسبة السحب الكتلي وضغط التكاثف الحرج مع القيم التجريبية التي حصل عليها (*Ruangtrakoon et al., 2011*) وكانت النتائج متقاربة.
- أظهرت النتائج الحاسوبية زيادة في نسبة السحب الكتلي باستخدام حجرة المزج المنحنية تحت شروط تشغيل مختلفة للمرجل 130 ℃ ~ 170 ℃.
- تنخفض نسبة السحب الكتلي لجميع التصاميم مع زيادة درجة حرارة المرجل وهذا ما يتوافق مع التصميم التقليدي.
- تُظهر التصاميم المقترحة أشكالاً مختلفة لنواة التيار الأولي عند كل درجة حرارة للمرجل مما يؤثر بشكل واضح على أداء القاذف.
- تم تحديد الربح في نسبة السحب الكتلي لكل تصميم عند كل درجة حرارة مرجل.
- يوجد تصميم واحد يكون عنده الربح في نسبة السحب الكتلي أعظمي عند درجة حرارة مرجل محددة. على سبيل المثال، عند درجة حرارة 170 ℃، يكون الربح في نسبة السحب الكتلي 36% باستخدام القاذف *Mix100-3*، بينما يصل إلى 29% عند درجة حرارة 160 ℃ باستخدام القاذف *Mix60-4* . يوفر القاذف *Mix80-3* ربحاً مقداره 21% في نسبة السحب الكتلي عند درجة حرارة 150 ℃، و 15% باستخدام القاذف *Mix60-3* عند درجة حرارة 140 ℃ وأخيراً يوفر القاذف *Mix40-3* ربحاً بنسبة 7% عند 130 ℃.
- تُبدي جميع التصاميم المقترحة زيادة تدريجية في ربح نسبة السحب الكتلي مع تزايد درجة حرارة المرجل عند درجات الحرارة المنخفضة، ويصبح ثابتاً عند درجات الحرارة الأعلى. على سبيل المثال، يحقق

القاذفان *Mix60-3.5* و*Mix80-3* ربحاً متزايداً بدءاً من درجة حرارة 140 °C إلى أن يصل إلى 21% عند درجة حرارة 150 °C، ويبقى الربح ثابتاً تقريباً إلى أن تصل درجة حرارة المرجل إلى 170 °C.

- ينخفض الربح في نسبة السحب الكتلية مع زيادة نصف قطر التقوس لحجرة المزج المنحنية ويزداد مجال درجات حرارة المرجل الذي يعمل عنده القاذف.
- إن ضـغط التكاثف الحرج للتصـاميم المقترحة لحجرة المزج المنحنية أخفض منه في التصـميم التقليدي، وخاصةً من أجل درجة حرارة المرجل أقل من 160 °C .
- تم حساب مردود القاذف لتقييم نسب السحب الكتلي وضغوط التكاثف الحرجة للتصاميم المقترحة ، فمثلاً عند درجة حرارة للمرجل 140 °C، تُظهر القواذف *Mix40-3* و *Mix60-3* مردود أفضل من التصميم التقليدي، حيث كان المردود 5.85% و5.95% على التتالي.
- تزداد التصـــاميم التي تبدي مردوداً أعلى من القاذف التقليدي عند درجة حرارة المرجل 150 °C وتحديداً القاذفان *Mix80-3* و*Mix60-3.5*. تُظهر جميع القواذف المقترحة مردوداً أعلى من التصـــميم التقليدي عند درجات حرارة المرجل 160 °C و 170 °C.
- مع ارتفاع درجة حرارة المرجل يزداد عدد التصاميم المقترحة التي تعطي مردوداً أعلى من مردود التصميم التقليدي.
- مع تناقص درجة حرارة المرجل تصبح حجرة المزج المنحنية ذات انصـاف الأقطار الأقل فعالة أكثر من انصاف الأقطار الكبيرة.
- تؤدي حجرة المزج المنحنية إلى انزياح المنطقة الفعالة نحو مخرج الفوهة في معظم التصاميم المقترحة
- تم تفسير تحسين المردود في التصـاميم المقترحة بالاعتماد على معادلة الاستمرار وتوزع البارامترات في مستوي المنطقة الفعالة وعلى طاقة الاضطراب الحركية
- أثّر تعديل الشكل الهندسي لحجرة المزج بشكل مباشر على موضع المنطقة الفعّالة وعلى شكل نواة التيار الأولي، حيث تسبب حجرة المزج المنحنية انزياح المنطقة الفعالة نحو مخرج الفوهة بالإضافة إلى ذلك يؤدي تغيير شكل نواة التيار الأولي في التصاميم المقترحة إلى تغير شكل مجرى التيار الثانوي والذي ينتج عنه زيادة في مساحة المنطقة الفعالة وبالتالي سحب كمية أكبر من السائل الثانوي من المبخر.
- وفقاً لتوزّع الضغط القطري يكون ضغط التيار الثانوي في حجرة المزج المنحنية أقل منه في القاذف التقليدي عند مستوى المنطقة الفعالة. يؤدي ذلك إلى ازدياد السرعة ويترافق بزيادة طفيفة في كثافة السائل الثانوي في بعض التصاميم وبالتالي حسب معادلة الاستمرار يزداد التدفق الكتلي الأعظمي للتيار الثانوي، وتزداد نسبة السحب الكتلي.

3-6 التوصيات والمقترحات

هناك العديد من التوصيات الممكن لحظها في نهاية البحث، وهي كالتالي:

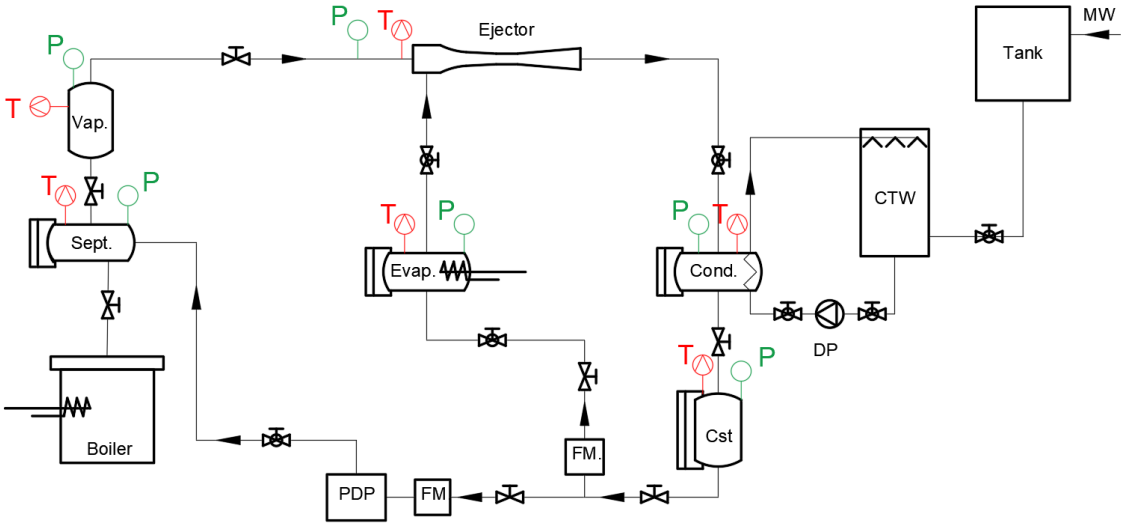
أ- ضرورة اجراء دراسات تجريبية لدراسة التأثير الفعلي لتعديل التصميم الهندسي الجديد لحجرة المزج في القاذف البخاري على أداء دارة التبريد.

ب- شملت الدراسة استطاعات تبريدية محدودة لم يتم التحقق من إمكانية تعميم هذه النتائج على دارات تبريد باستطاعات مختلفة.

ج- تبين من خلال العمل ان انصاف الأقطار الأفضل لقوس جدار حجرة المزج المقترحة تتعلق بشكل واضح بدرجة حرارة بخار المرجل، يوصى بمتابعة العمل من اجل الوصول الى علاقات رياضية تربط التصميم الجديد بدرجة حرارة المرجل مما يساعد المهندسين الذين سيعملون في تصميم هذه القواذف لاحقاً على انجاز المطلوب بالدقة اللازمة.

د- قد لا تكون بعض المتغيرات مثل خصائص التيار الأولي والثانوي أو تغيرات درجات الحرارة قد خضعت للدراسة بعمق. إن التركيز على هذه العوامل بشكل أكبر في البحوث اللاحقة قد يعطي نتائج إضافية مهمة في هذا المجال.

من أجل دراسة حجرة المزج المنحنية المقترحة تجريبياً تم اقتراح بناء دارة تبريد قاذفة للبخار مبينة في الشكل (6-1).



Boiler	المرجل	***MW***	ماء تعويض	***Sept.***	فاصل السائل	***Tank***	خزان
Cst	مجمع سائل	***Cond.***	مكثف	***Evap.***	مبخر	***Vap.***	مجمع البخار
CTW	برج تبريد	***DP***	مضخة حجمية	***FM***	مقياس تدفق		

الشكل(6-1): المخطط المقترح لدارة التبريد القاذفة للبخار التجريبية

قائمة المراجع *Bibliography*

Allouche, Y., Bouden, C., & Varga, S. (2014). A CFD analysis of the flow structure inside a steam ejector to identify the suitable experimental operating conditions for a solar-driven refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, *39*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.07.027

Al-Rbaihat, R., Saleh, K., Malpress, R., Buttsworth, D., Alahmer, H., & Alahmer, A. (2023). Performance evaluation of supersonic flow for variable geometry radial ejector through CFD models based on DES-turbulence models, GPR machine learning, and MPA optimization. *International Journal of Thermofluids*, *20*. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100487

ANSYS Fluent user guide (2020). (n.d.). FLUENT INC. .

Aphornratana, S., & Eames, I. W. (1997). A small capacity steam-ejector refrigerator: Experimental investigation of a system using ejector with movable primary nozzle. *International Journal of Refrigeration*, *20*(5). https://doi.org/10.1016/S0140-7007(97)00008-X

Ariafar, K., Buttsworth, D., Al-Doori, G., & Malpress, R. (2015). Effect of mixing on the performance of wet steam ejectors. *Energy*, *93*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.082

Banasiak, K., Hafner, A., & Andresen, T. (2012). Experimental and numerical investigation of the influence of the two-phase ejector geometry on the performance of the R744 heat pump. *International Journal of Refrigeration*, *35*(6). https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.04.012

Bartosiewicz, Y., Aidoun, Z., Desevaux, P., & Mercadier, Y. (2005). Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *26*(1). https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.003

Besagni, G., Cristiani, N., Croci, L., Guédon, G. R., & Inzoli, F. (2021). Computational fluid-dynamics modelling of supersonic ejectors: Screening of modelling approaches, comprehensive validation and assessment of ejector component efficiencies. *Applied Thermal Engineering*, *186*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116431

Besagni, G., & Inzoli, F. (2017). Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*, *117*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.011

Besagni, G., Mereu, R., & Inzoli, F. (2016). Ejector refrigeration: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *53*, 373–407. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.059

Butrymowicz, D., Śmierciew, K., Karwacki, J., & Gagan, J. (2014). Experimental investigations of low-temperature driven ejection refrigeration cycle operating with isobutane. *International Journal of Refrigeration*, *39*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.10.008

Cai, L., Zheng, H. T., Li, Y. J., & Li, Z. M. (2012). Computational fluid dynamics simulation of the supersonic steam ejector. Part 2. Optimal design of geometry and the effect of operating conditions on the ejector. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *226*(3). https://doi.org/10.1177/0954406211415779

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: an Engineering Approach 8th Edition. In *McGraw-Hill*.

Chen, W., Chong, D., Yan, J., & Liu, J. (2011). Numerical optimization on the geometrical factors of natural gas ejectors. *International Journal of Thermal Sciences*, *50*(8). https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.026

Chou, S. K., Yang, P. R., & Yap, C. (2001). Maximum mass flow ratio due to secondary flow choking in an ejector refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, *24*(6), 486–499. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00074-8

Chunnanond, K., & Aphornratana, S. (2004a). An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector. *Applied Thermal Engineering*, *24*(2–3), 311–322. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.07.003

Chunnanond, K., & Aphornratana, S. (2004b). Ejectors: applications in refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *8*(2), 129–155. https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.10.001

Dong, J., Hu, Q., Yu, M., Han, Z., Cui, W., Liang, D., Ma, H., & Pan, X. (2020). Numerical investigation on the influence of mixing chamber length on steam ejector performance. *Applied Thermal Engineering*, *174*. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115204

Duan, D., Xi, X., Liu, F., Xu, X., & Zhang, B. (2023). Influence of Geometrical Parameters on Supersonic Steam-Ejector Performance. *Heat Transfer Engineering*, *44*(15), 1391–1406. https://doi.org/10.1080/01457632.2022.2134079

Dvorak, V., & Safarik, P. (2003). Supersonic flow structure in the entrance part of a mixing chamber of 2d model ejector. *Journal of Thermal Science*, *12*(4). https://doi.org/10.1007/s11630-003-0042-8

Dvorak, V., & Safarik, P. (2005). Transonic instability in entrance part of mixing chamber of high-speed ejector. *Journal of Thermal Science*, *14*(3). https://doi.org/10.1007/s11630-005-0011-5

Dvorak, V., & Vit, T. (2005). Experimental And Numerical Study Of Constant Area Mixing. *16th International Symposium on Transport Phenomena*.

Eames, I. W. (2002). A new prescription for the design of supersonic jet-pumps: The constant rate of momentum change method. *Applied Thermal Engineering*, *22*(2). https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00079-5

Eames, I. W., Ablwaifa, A. E., & Petrenko, V. (2007). Results of an experimental study of an advanced jet-pump refrigerator operating with R245fa. *Applied Thermal Engineering*, *27*(17–18), 2833–2840. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.009

Eames, I. W., Aphornratana, S., & Haider, H. (1995). A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, *18*(6), 378–386. https://doi.org/10.1016/0140-7007(95)98160-M

Eames, I. W., Wu, S., Worall, M., & Aphornratana, S. (1999). An experimental investigation of steam ejectors for applications in jet-pump refrigerators powered by low-grade heat. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *213*(5). https://doi.org/10.1243/0957650991537734

ESDU. (1986). Ejectors and jet pumps. Design for steam driven flow. In *Engineering Sciences Data Unit*.

Fabri, J., & Siestrunck, R. (1958). Supersonic Air Ejectors. *Advances in Applied Mechanics*, *5*(C). https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70016-4

Fan, J., Eves, J., Thompson, H. M., Toropov, V. V., Kapur, N., Copley, D., & Mincher, A. (2011). Computational fluid dynamic analysis and design optimization of jet pumps. *Computers and Fluids*, *46*(1). https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.10.024

Feng, X., Zhang, Z., Wu, Y., & Tian, D. (2022). A Parametric Study on the Effect of Mixing Chamber for Expansion Work Recovery CO2 Ejector. *Journal of Thermal Science*, *31*(6). https://doi.org/10.1007/s11630-022-1606-9

Gagan, J., Smierciew, K., Butrymowicz, D., & Karwacki, J. (2014). Comparative study of turbulence models in application to gas ejectors. *International Journal of Thermal Sciences*, *78*. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.009

García Del Valle, J., Sáiz Jabardo, J. M., Castro Ruiz, F., & San José Alonso, J. (2012). A one dimensional model for the determination of an ejector entrainment ratio. *International Journal of Refrigeration*, *35*(4). https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.11.020

H. W. Liepmann, & A. Roshko. (2001). *Elements of gas dynamics* (Dover edition). Dover Publications, Inc.

Haghparast, P., Sorin, M. V., & Nesreddine, H. (2018). The impact of internal ejector working characteristics and geometry on the performance of a refrigeration cycle. *Energy*, *162*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.017

Han, Y., Wang, X., Sun, H., Zhang, G., Guo, L., & Tu, J. (2019). CFD simulation on the boundary layer separation in the steam ejector and its influence on the pumping performance. *Energy*, *167*, 469–483. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.10.195

Han, Y., Wang, X., Yuen, A. C. Y., Li, A., Guo, L., Yeoh, G. H., & Tu, J. (2020). Characterization of choking flow behaviors inside steam ejectors based on the ejector refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, *113*, 296–307. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.02.003

Huang, B. J., Jiang, C. B., & Hu, F. L. (1985). Ejector Performance Characteristics and Design Analysis of Jet Refrigeration System. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *107*(3), 792–802. https://doi.org/10.1115/1.3239802

J. Anderson. (2021). *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective* (fourth). McGraw-Hill.

J. O. Hinze. (1975). *Turbulence*. McGraw-Hill.

Keenan, J. H., & Neumann, E. P. (1942). A Simple Air Ejector. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, *9*(2). https://doi.org/10.1115/1.4009187

Keenan, J. H., Neumann, E. P., & Lustwerk, F. (1950). An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment. *Journal of Applied Mechanics*, *17*(3). https://doi.org/10.1115/1.4010131

Kong, F., Kim, H. D., & Setoguchi, T. (2015). An investigation of the effective pressure ratio effects on the ejector-diffuser system. *Journal of Visualization*, *18*(1). https://doi.org/10.1007/s12650-014-0235-0

Kracik, J., & Dvorak, V. (2022). Secondary flow choking in axisymmetric supersonic air ejector with adjustable motive nozzle. *Applied Thermal Engineering*, *204*, 117936. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117936

Kumar, A., Yadav, S. K., Kumar, V., & Kulkarni, A. (2024). A comprehensive exploration of ejector design, operational factors, performance metrics, and practical applications. In *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (Vol. 46, Issue 1). https://doi.org/10.1007/s40430-023-04618-8

Kumar, V., Singhal, G., & Subbarao, P. M. V. (2013). Study of supersonic flow in a constant rate of momentum change (CRMC) ejector with frictional effects. *Applied Thermal Engineering*, *60*(1–2). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.045

Lamberts, O., Chatelain, P., & Bartosiewicz, Y. (2018). Numerical and experimental evidence of the Fabri-choking in a supersonic ejector. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *69*. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.01.002

Lamberts, O., Chatelain, P., Bourgeois, N., & Bartosiewicz, Y. (2018). The compound-choking theory as an explanation of the entrainment limitation in supersonic ejectors. *Energy*, *158*, 524–536. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.036

Li, A., Yuen, A. C. Y., Chen, T. B. Y., Wang, C., Liu, H., Cao, R., Yang, W., Yeoh, G. H., & Timchenko, V. (2019). Computational study of wet steam flow to optimize steam ejector efficiency for potential fire suppression application. *Applied Sciences (Switzerland)*, *9*(7). https://doi.org/10.3390/app9071486

Li, Y., Shen, S., Niu, C., Mu, X., & Zhang, L. (2023). The effect of variable motive pressures on the performance and shock waves in a supersonic steam ejector with non-equilibrium condensing. *International Journal of Thermal Sciences*, *185*. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.108034

Li, Y., & Yu, J. (2019). The effects of ejector geometry parameter and refrigerant charge amount on an ejector-expansion refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, *152*, 402–408. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.078

Lin, C., Cai, W., Li, Y., Yan, J., Hu, Y., & Giridharan, K. (2013). Numerical investigation of geometry parameters for pressure recovery of an adjustable ejector in multi-evaporator refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, *61*(2), 649–656. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.033

Little, A. B., & Garimella, S. (2016). A critical review linking ejector flow phenomena with component- and system-level performance. *International Journal of Refrigeration*, *70*, 243–268. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.05.015

Lu, Y., Bai, T., & Yu, J. (2023). Investigation on the influence of geometric parameters on two-phase ejector performance with R290. *International Journal of Refrigeration*, *156*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.09.020

Mukhtar, H. K., Fadlalla, A., Ibrahim, R., & Ghani, S. (2024). Numerical Investigation of the Flow Characteristics Inside a Supersonic Vapor Ejector. *International Journal of Thermofluids*, 100912. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100912

Munday, J. T., & Bagster, D. F. (1977). A New Ejector Theory Applied to Steam Jet Refrigeration. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, *16*(4), 442–449. https://doi.org/10.1021/i260064a003

NAKAGAWA, M., MARASIGAN, A. R., & MATSUKAWA, T. (2010). EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TWO-PHASE EJECTOR SYSTEM WITH VARYING MIXING CROSS-SECTIONAL AREA USING NATURAL REFRIGERANT CO_2. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, *18*(04). https://doi.org/10.1142/s2010132510000320

Nakagawa, M., Marasigan, A. R., Matsukawa, T., & Kurashina, A. (2011). Experimental investigation on the effect of mixing length on the performance of two-phase ejector for CO2 refrigeration cycle with and without heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, *34*(7). https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.07.021

Pianthong, K., Seehanam, W., Behnia, M., Sriveerakul, T., & Aphornratana, S. (2007). Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique. *Energy Conversion and Management*, *48*(9). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.021

Porcar, R., & Prenel, J. P. (1976). Visualisation des ondes de choc dans un ejecteur supersonique: Exploitation de la polarisation de la lumiere diffusee. *Optics Communications*, *17*(3). https://doi.org/10.1016/0030-4018(76)90277-7

Power, R. B. (2021). Steam Jet Ejectors for the Process Industries. In *Steam Jet Ejectors for the Process Industries*. https://doi.org/10.1115/1.884829

Ramesh, A. S., & Sekhar, S. J. (2017). Analytical and numerical studies of a steam ejector on the effect of nozzle exit position and suction chamber angle to fluid flow and system performance. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *10*(1). https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.73.238.26027

Rand, C. P., Poirier, M., & Poncet, S. (2023). Single-phase air parallel ejectors: An experimental and numerical study. *International Journal of Refrigeration*, *150*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.018

Ruangtrakoon, N., & Aphornratana, S. (2014). Development and performance of steam ejector refrigeration system operated in real application in Thailand. *International Journal of Refrigeration*, *48*. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.010

Ruangtrakoon, N., & Aphornratana, S. (2019). Design of steam ejector in a refrigeration application based on thermodynamic performance analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *31*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.014

Ruangtrakoon, N., Aphornratana, S., & Sriveerakul, T. (2011). Experimental studies of a steam jet refrigeration cycle: Effect of the primary nozzle geometries to system performance. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *35*(4), 676–683. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.01.001

Ruangtrakoon, N., Thongtip, T., Aphornratana, S., & Sriveerakul, T. (2013). CFD simulation on the effect of primary nozzle geometries for a steam ejector in refrigeration cycle. *International Journal of Thermal Sciences*, *63*. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.07.009

Rusly, E., Aye, L., Charters, W. W. S., & Ooi, A. (2005). CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system. *International Journal of Refrigeration*, *28*(7). https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.02.005

Samaké, O., Galanis, N., & Sorin, M. (2016). On the design and corresponding performance of steam jet ejectors. *Desalination*, *381*. https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.027

Samsam-Khayani, H., Yoon, S. Y., Kim, M., & Kim, K. C. (2023). Experimental and numerical study on low-temperature supersonic ejector. *International Journal of Thermofluids*, *20*. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100407

Sankarlal, T., & Mani, A. (2007). Experimental investigations on ejector refrigeration system with ammonia. *Renewable Energy*, *32*(8). https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.05.008

Sriveerakul, T., Aphornratana, S., & Chunnanond, K. (2007a). Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results. *International Journal of Thermal Sciences*, *46*(8). https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.014

Sriveerakul, T., Aphornratana, S., & Chunnanond, K. (2007b). Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 2. Flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries. *International Journal of Thermal Sciences*, *46*(8). https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.012

Stryjek, R., & Vera, J. H. (1986). PRSV: An improved peng—Robinson equation of state for pure compounds and mixtures. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *64*(2). https://doi.org/10.1002/cjce.5450640224

Tang, Y., Liu, Z., Li, Y., Wu, H., Zhang, X., & Yang, N. (2019). Visualization experimental study of the condensing flow regime in the transonic mixing process of desalination-

oriented steam ejector. *Energy Conversion and Management*, *197*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111849

Tashtoush, B. M., Al-Nimr, M. A., & Khasawneh, M. A. (2019). A comprehensive review of ejector design, performance, and applications. In *Applied Energy* (Vol. 240). https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185

Tavakoli, M., Nili-Ahmadabadi, M., Joulaei, A., & Ha, M. Y. (2023). Enhancing subsonic ejector performance by incorporating a fluidic oscillator as the primary nozzle: a numerical investigation. *International Journal of Thermofluids*, *20*. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100429

Varga, S., Oliveira, A. C., Ma, X., Omer, S. A., Zhang, W., & Riffat, S. B. (2011). Experimental and numerical analysis of a variable area ratio steam ejector. *International Journal of Refrigeration*, *34*(7). https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.12.020

Wang, X., Dong, J., Li, A., Lei, H., & Tu, J. (2014). Numerical study of primary steam superheating effects on steam ejector flow and its pumping performance. *Energy*, *78*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.004

Yadav, R. L., & Patwardhan, A. W. (2008). Design aspects of ejectors: Effects of suction chamber geometry. *Chemical Engineering Science*, *63*(15). https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.04.012

Yadav, S. K., Pandey, K. M., Kumar, V., & Gupta, R. (2020). Computational analysis of a supersonic two-stage ejector. *Materials Today: Proceedings*, *38*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.483

Yapici, R., Ersoy, H. K., Aktoprakoğlu, A., Halkaci, H. S., & Yiğit, O. (2008). Experimental determination of the optimum performance of ejector refrigeration system depending on ejector area ratio. *International Journal of Refrigeration*, *31*(7). https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.02.010

Zhang, Z., Tian, L., Tong, L., & Chen, Y. (2014). Choked flow characteristics of subcritical refrigerant flowing through converging-diverging nozzles. *Entropy*, *16*(11). https://doi.org/10.3390/e16115810

Zheng, H. T., Cai, L., Li, Y. J., & Li, Z. M. (2012). Computational fluid dynamics simulation of the supersonic steam ejector. Part 1: Comparative study of different equations of state. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *226*(3). https://doi.org/10.1177/0954406211415777

Zhu, Y., Cai, W., Wen, C., & Li, Y. (2009). Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Applied Thermal Engineering*, *29*(5–6). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.04.025

Zhu, Y., & Jiang, P. (2014). Experimental and analytical studies on the shock wave length in convergent and convergent-divergent nozzle ejectors. *Energy Conversion and Management*, *88*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.023

الأبحاث العلمية المنشورة

تاريخ النشر	مكان النشر	العنوان
2024/12/30	***International Journal of Thermofluids***	A new mixing chamber geometry design for supersonic ejector performance optimization using computational fluid dynamics
2024/8/18	جامعة دمشق	دراسة عددية لتأثير مساحة مقطع دخول التيار الثانوي في حجرة المزج على أداء القاذف البخاري فوق الصوتي
2024/5/8	جامعة دمشق	دراسة تأثير موجات التمدد على أداء القاذف البخاري المستخدم في دارات التبريد
2024/2/6	جامعة دمشق	تحديد مجالات استخدام العلاقات الرياضية الناظمة لجريان ايزوانتروبي عند تصميم القاذف البخاري فوق الصوتي باستخدام ديناميك السوائل الحسابي

Abstract

The use of steam ejector refrigeration system has been limited due to their low coefficient of performance, which is directly related to the performance of the ejector. Improving the performance of supersonic steam ejectors has attracted many researchers, as these ejectors can operate on alternative low-energy heat sources. This research aims to study the effect of operational and design parameters on the performance of the supersonic steam ejector and propose a new design to improve performance using computational fluid dynamics. The dimensions of the steam ejector were determined using the thermodynamic equations of the flow field as an isentropic process, with the error found to be acceptable within their validity range. The study observed that the performance of the theoretically designed steam ejector was not optimal, leading to the development of design correction factors to modify the diameters for the best performance under the studied operating conditions.

A new curved design of the arc-shaped mixing chamber was proposed. The performance of ten different curved mixing chamber designs was investigated within the range of boiler temperatures from 130 ℃ to 170 ℃ and an evaporator temperature of 7.5 ℃. The proposed designs feature arc radii ranging from 622.25 mm to 1420.76 mm. The entrainment ratio significantly increased with the new design, while the critical condensing pressure decreased. For instance, the entrainment ratio increased by 37%, and the critical condensing pressure decreased by 10% at a boiler temperature of 170 ℃. Thus, ejector performance was evaluated based on efficiency. The efficiency of the ejector with a curved mixing chamber was higher than that of the conventional design at boiler temperatures above 140 ℃. Notably, the design that maximizes efficiency varies with changing boiler temperatures. Simulation results also indicated that the entrainment ratio decreased as the boiler temperature increased, exhibiting similar behavior to the conventional design. These results were interpreted based on the parameter changes in the flow field and their longitudinal and lateral distribution.

Keywords: steam ejector refrigeration system, supersonic steam ejectors, computational fluid dynamics, entrainment ratio, curved mixing chamber.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department of General Mechanical Engineering

Improving the Performance of Steam Jet Refrigeration Systems by Controlling the Flow Field in the Ejector

A dissertation Submitted in Fulfilment of the
Requirements for the Degree of PhD in
Fluid mechanics

by

Amer Muzaber

Supervisor

Dr. Assem Kaddah

2025